炭素繊維法による温室効果ガス一酸化二窒素N2Oの削減

小暮　幸雄　　Yukio KOGURE

温暖化が地球環境に弊害をもたらすことは世界共通認識となり、温室効果ガス削減が求められているが、二酸化炭素の約３００倍の温室効果を持つ一酸化二窒素削減対策はほとんど取られていない。廃水処理設備曝気槽にアンモニア態窒素が流入すると好気性硝化菌により亜硝酸→硝酸と変成して蓄積され一酸化二窒素が発生してしまう。一酸化二窒素発生を防ぐためには、硝酸から窒素への分解を促進させることだが、その働きをする嫌気性脱窒菌は、好気条件の曝気槽には存在しない。炭素繊維水質浄化材を曝気槽に設置すると、表層に付着する好気性硝化菌により、アンモニア態窒素は亜硝酸→硝酸となり、深層にて付着する嫌気性脱窒菌により窒素へと分解され、窒素は大気へと拡散される。その結果、炭素繊維により温室効果ガス一酸化二窒素発生は削減されて地球温暖化防止対策となる。

１．はじめに

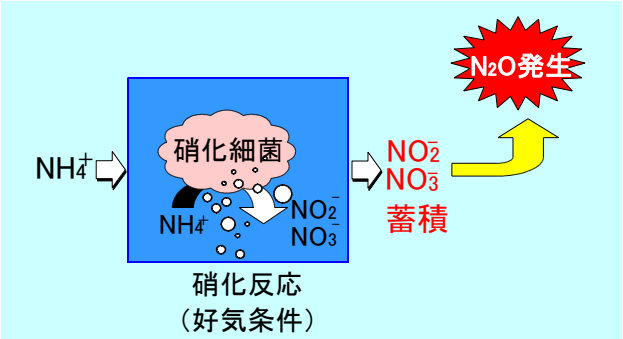
都市下水や畜産廃水、有機工業廃水等の処理方法は一般的に活性汚泥法により行われている。しかし、従来の活性汚泥法では、有機物は活性汚泥槽にて好気性細菌の働きにより分解処理されるが、アンモニア態窒素（NH4－N）は活性化する硝化細菌により亜硝酸（NO2）から硝酸（NO3）と変成するだけで、窒素成分（N）は除去されない。このアンモニア態窒素の変成過程において亜硝酸や硝酸が曝気槽内へ蓄積すると、温室効果ガスである一酸化二窒素（N2O）が発生してしまう。生物的窒素処理工程を有する排水処理施設では嫌気処理槽を設けることにより、硝酸から窒素へと分解を図り、最終的に窒素成分：全窒素（TN）が除去されるが、活性汚泥槽では曝気により硝酸が蓄積され一酸化二窒素が発生している。さらに、発生する余剰汚泥からも一酸化二窒素が発生し、汚泥が嫌気状態となると別の温室効果ガス：メタン（CH4）も発生してしまう。近年、高度処理システムとして普及が進む膜分離活性汚泥法（MBR）でも、活性汚泥槽は標準活性汚泥法と同様原理であり一酸化二窒素が発生している。このような廃水処理設備からの一酸化二窒素発生を防止する必要がある。

２．一酸化二窒素発生抑制技術

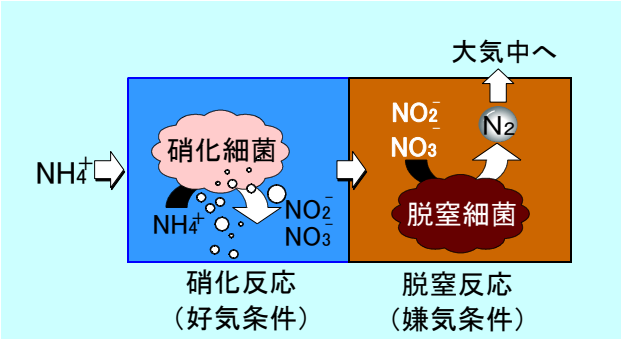
活性汚泥槽での一酸化二窒素発生を防止するには、槽内に亜硝酸や硝酸を蓄積をさせないことであり、硝酸を速やかに窒素に分解してしまうことである。窒素に分解するためには、好気条件の活性汚泥槽において嫌気性脱窒細菌の働きが必要となる。活性汚泥槽において、嫌気状態を創り出し脱窒細菌を活性化させることにより、アンモニア態窒素→亜硝酸→硝酸→窒素という分解反応が速やかに行われ一酸化二窒素の発生を削減することができる。

炭素繊維水質浄化材ミラカーボンは、ほぼ100%炭素質の炭素繊維から造られた生物膜処理用接触材で、活性汚泥処理槽の廃水中に設置すると表層に好気性細菌が、深層に嫌気性細菌が付着する。表層では好気性硝化細菌の働きによりアンモニア態窒素→亜硝酸→硝酸となり、深層では嫌気性脱窒細菌の働きにより硝酸→窒素と分解され、最終生成物の窒素は大気中に拡散される。この脱窒工程が速やかに行われることにより、活性汚泥槽に亜硝酸や硝酸が蓄積されず一酸化二窒素の発生が削減される。

炭素繊維水質浄化材ミラカーボンを活性汚泥槽内に生物膜接触材として設置すると、好気性及び嫌気性微生物とが共存・活性化して有機物分解除去効果を高めるだけでなく、活性汚泥法では従来処理することのできなかった亜硝酸、硝酸等の窒素酸化物を分解除去することができる。窒素酸化物の速やかな分解は、二酸化炭素の約300倍の温室効果をもつ一酸化二窒素の発生を削減し、廃水処理設備は温室効果ガスを排出しない地球温暖化防止施設となる。

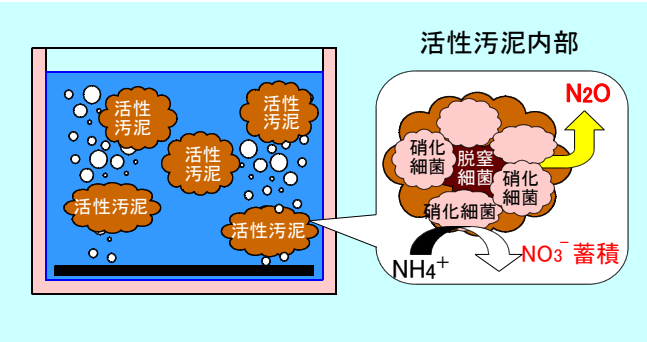


図－１ NH4－NからのN2O発生

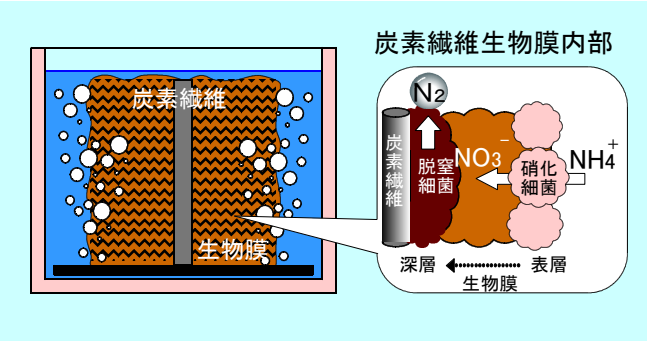


図－２ NH4－NからN2への分解

小暮　幸雄（こぐれ　ゆきお）Yukio KOGURE
株式会社ソーエン　〒370-0018 群馬県高崎市新保町1665-1　E-mail:kogure@so-en.net　URL:http:so-en.net/



図－3 活性汚泥法によるN2O発生



図－4 炭素繊維法によるN2O抑制

３．炭素繊維水利用技術

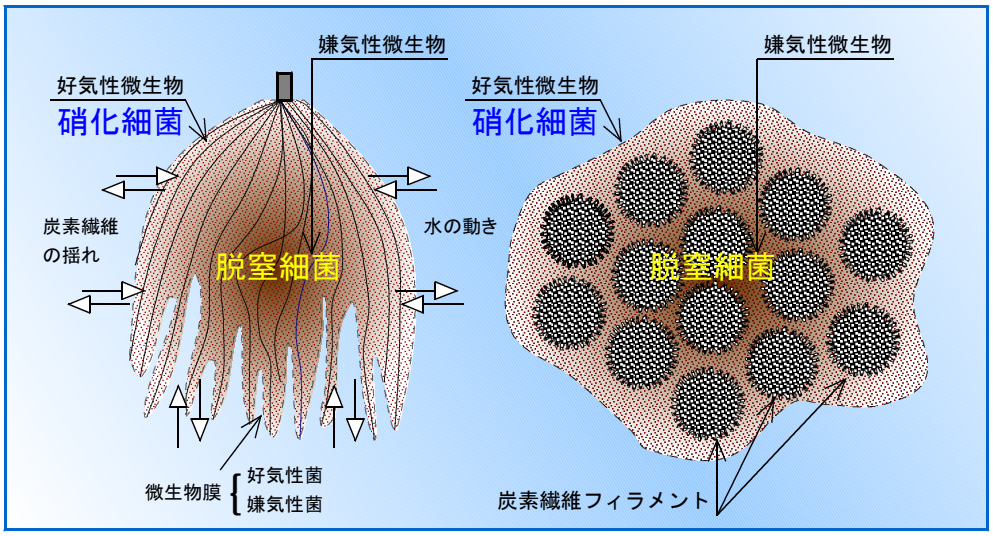
炭素繊維水質浄化材は、先端材料である炭素繊維から製造され、炭素繊維の軽くて強い工学的特性、炭素質からくる生物親和性、電気的特性など優れた特性を持ち合わせ、河川や湖沼等の直接的水質浄化や、水産養殖や藻場造成等に幅広く利用されている。水質浄化材に用いられる炭素繊維は、ＰＡＮ系（ポリアクリロニトリル繊維）で直径７μmの微細フィラメントが 12,000 本あるいは 15,000 本にて構成され、一般工業用炭素繊維とは異なり水中での広がりを持たせるため水溶性サイジング処理が施されている。ＰＡＮ系炭素繊維は、日本の炭素繊維メーカーが世界の大部分を生産する先端工業製品で、航空機や自動車などに多用途に利用されており、水溶性サイジング処理の施された水質浄化材製品は、ミラカーボンが世界唯一である。炭素繊維による水質浄化は、炭素繊維の微細フィラメントの持つ大きな表面積による汚濁物質捕捉能力と、併せて付着する有用微生物群が形成する生物膜が汚濁物質を分解することで達成される。この水質浄化メカニズムは、排水処理における生物膜処理を炭素繊維接触材にて行うもので、同様の目的にて市販されている製品に化学繊維や綿繊維、プラスチック製接触材がある。

炭素繊維は、それら材料と比べ比表面積や電気的特性に大きな優位点があり、電気的抵抗が小さく伝導性が高いため、細菌や微生物が付着しやすいことが科学的に立証されている。

さらに、軽くて高弾性な７μmの微細フィラメント集合体が、水中で揺れることによりフィラメント間に大量の微生物を保持して、活性化することにより剥離しづらくなる。炭素繊維に大量に付着した微生物群は、大きな塊となり表層に好気性細菌、深層には嫌気性細菌が固着して、炭素繊維の揺れにより水中の有機物や栄養塩類を捕食・分解する。この炭素繊維の微生物群にアンモニア態窒素が捕捉されると、表層の好気性硝化菌の働きにより亜硝酸から硝酸へ変成し、深層の嫌気性脱窒細菌により硝酸から窒素に分解され大気へ拡散される。この結果、窒素が除去されると共に、窒素酸化物蓄積により生成されていた一酸化二窒素の発生が無くなる。炭素繊維による水質浄化と温室効果ガス削減は、炭素繊維の持つ優れた物質特性による水質浄化メカニズムであり、大きなエネルギーを必要としない持続可能な処理方法である。

４．温室効果ガス削減の有効性

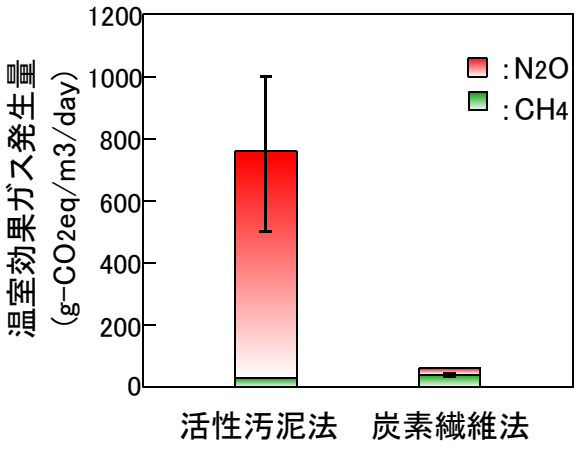
一酸化二窒素削減は、炭素繊維に付着する好気性及び嫌気性細菌の働きによって行われる。廃水中に含まれるアンモニア態窒素は、炭素繊維表層の好気性硝化細菌と深層の嫌気性脱窒細菌の働きにより亜硝酸から硝酸へと変成し、最終的に水と窒素に分解される。炭素繊維を用いない一般的活性汚泥法では、アンモニア態窒素は好気性細菌により硝化され亜硝酸から硝酸とは変成するが、廃水中に蓄積されるため窒素成分は除去されない。



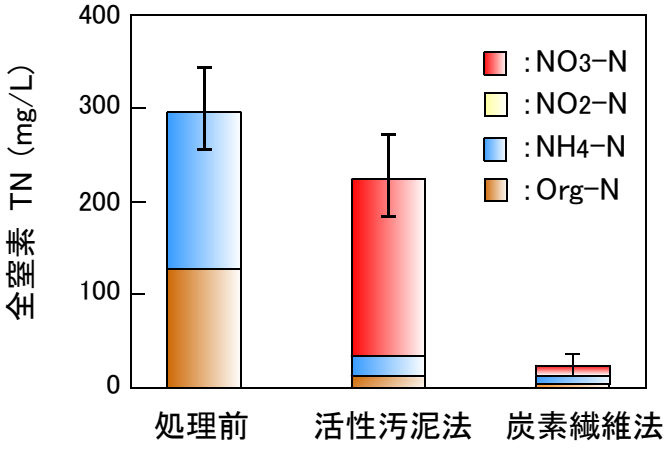
図－5 炭素繊維法による水質浄化メカニズム

図－6 浄化槽内の炭素繊維設置状況1

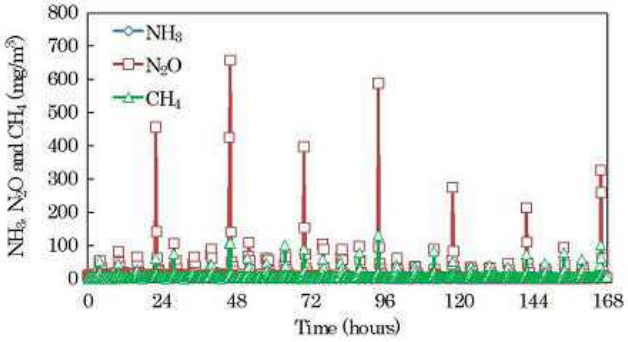
図－7 浄化槽内の炭素繊維設置状況2



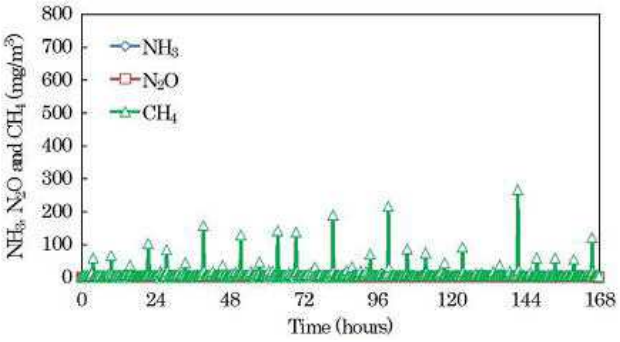
図－8 温室効果ガス発生量比較



図－9 窒素削減量の比較



図－10 活性汚泥法による温室効果ガス発生



図－11 炭素繊維法による温室効果ガス発生

炭素繊維の表層に付着する好気性微生物は活性化して有機物を捕食分解するため有機物分解能力も高く、有機物を栄養源として活性化した微生物群は高い脱窒効果をもたらす。速やかに窒素酸化物分解が行われることにより、副産物である温室効果ガスの一酸化二窒素の発生が無くなり、活性汚泥法処理施設より温室効果ガスは排出削減される。

炭素繊維水利用技術は、2008年から本格的に炭素繊維水質浄化材を活用した水質浄化事業として、日本国内をはじめ、環境破壊が顕著となった新興国、発展途上国での実施されている。炭素繊維水利用技術は、1990年代より研究開発されて河川や湖沼における水質浄化の有効性が実証されたが、技術標準化や生産体制、設計方法を確立できず事業化に至らなかった。その後、炭素繊維水利用技術研究会が結成され課題を解決したことにより、公共事業にて環境改善工事として発注され、近年では排水処理設備の機能向上材料としてその効果が認められている。

炭素繊維の水質浄化効果が多くのメディアにて紹介されたことにより海外へも周知され、環境破壊の著しい中国を始めとして韓国、台湾等周辺国やASEAN諸国への輸出が開始された。2011年、南アフリカダーバンにて開催されたCOP17第17回国連気候変動枠組み条約国会議サイドイベントジャパンブースに展示されたこと

を契機にアフリカでの実証が開始され、さらに2013年横浜市で開催のTICAD Ⅴ第5回アフリカ開発会議アフリカンフェアー2013にて紹介されたことによりアフリカサブサハラ地域での生活廃水処理や鉱山廃水処理にて利用されている。

海外での使用実績として最も大きいのは、環境破壊の著しい中国で、既に河川や湖沼の水質浄化技術として有効性が認められ定着している。国家実証プロジェクトにも採用され、廃水処理施設での水質浄化効果が認識されていることから、中国への輸出は増加傾向にある。アジア圏では、シンガポールやベトナム、タイ、マレーシアにて実績があり、フィリピンのニッケル鉱山廃水処理にも利用され、インドでの普及も期待できる。ロシアでは、雨水処理を行っているモスクワの国営企業から炭素繊維水質浄化材の効果が認められている。

５．炭素繊維水利用技術の将来性

日本における汚水処理人口普及率は、2015年度末にて89.9%となり、一部の離島や山間部を除いて下水道施設、農業集落排水施設、浄化槽等にて汚水処理されている。環境意識の高まりや法規制強化により民間企業の有機工業廃水、畜産廃水等の廃水処理整備も進み、多くの処理方法は活性汚泥法が主体となっている。その結果、全ての活性汚泥槽から一酸化二窒素発生が発生していることになる。活性汚泥槽からの一酸化二窒素の発生は、従来から知られているが、多くは処理工程上の不可抗力として、特段の対策は取られず放置されているのが実態である。

近年の水処理技術進歩により、膜処理等の高度処理施設の普及が進んでいるが、建設費用や維持管理費、運転費用が高額化し経済的負担が増大している。高度処理は、飲料水浄水工程においては衛生的に有益ではあるが、下水処理や工場廃水処理分野においては必然ではない。一定量の有機物や栄養塩類を自然界に還元することが生態系保全には必要であり、近海の水産資源確保に不可欠である。また、少子化による人口減少と社会的熟期において高額な高度処理施設は、建設時の財政負担を増大させるだけでなく、維持管理や運転費用を増加させ、老朽化施設更新の障害となってしまう。

炭素繊維の廃水処理設備への利用は、従来処理することのできなかった活性汚泥槽での窒素除去を可能とし、温室効果ガスの一酸化二窒素発生を削減できる。炭素繊維水質浄化材は、既設の処理設備に設置するだけで効力を発揮し、特別な維持管理やエネルギーを必要とせず、維持管理費や運転費用の削減ともなり、極めて費用対効果が高い持続可能な水処理方法として有望である。

今後、水質汚染防止の観点から窒素量的規制が強化されることから、窒素除去効果と共に強烈な温室効果ガスの一酸化二窒素発生削減効果が社会的に認識され、地球温暖化対策とし炭素繊維法が普及しパッシブで持続可能な水処理技術として大きな需要が期待できる。

欧米等の先進国においては、都市部の廃水処理施設が老朽化して更新時期を迎えているが、近年の経済不況や資源価格低迷により、新規投資はできずに容易な水処理機能向上方法が求められている。現在、炭素繊維法採用が検討されているが、炭素繊維法による水処理機能向上と一酸化二窒素発生削減は、採用の大きな優位点となる。

アジアやアフリカ、中南米諸国の発展途上国では、大都市中心部のインフラは整備されても、郊外や中小都市の下水道工場廃水処理の整備は進まず水質汚染が深刻となっている。酸化池やラグーン方式と呼ばれる初歩的な廃水処理を行っている地域も多く、都市への人口集中により排水量が増大し処理機能が低下している。それら処理設備では窒素酸化物の増大により一酸化二窒素が発生し、汚泥堆積によりメタン発生も招いている。発展途上国に、早期に下水道施設を普及させることが望ましいが、高額な高度処理施設である必要はなく、従来型の活性汚泥処理にて足りる。活性汚泥槽に炭素繊維を設置すれば、経済的負担も少なく、維持管理が容易で、運転費用も少ない持続可能な水処理システムとなる。有機物の除去だけでなく、窒素を分解処理し、一酸化二窒素の発生を削減することができる。短期的に見ても、既存の老朽化した活性汚泥槽や酸化池、ラグーン処理池に炭素繊維水質浄化材を設置することで、処理機能の向上と一酸化二窒素発生を削減することが可能となり、直ぐに実行できる発展途上国や新興国の地球温暖化対策となる。

図－12 老朽化した活性汚泥槽（ロシア）

図－13 曝気式ラグーン処理池（ペルー）

６．おわりに

廃水処理設備からの一酸化二窒素発生削減は、一般的に注目されず認知度が低いため対策が取られていないのが現状である。廃水処理設備は、汚水から汚染物質を除去して処理水放流先の水質汚染防止を目的とする、人類にとって重要かつ不可欠な工業プロセスである。廃水処理による主な除去指標は有機物で処理方式は活性汚泥処理法主体のため、活性汚泥槽に窒素酸化物が蓄積すると一酸化二窒素が発生してしまう。将来、世界中に廃水処理設備が普及して水質汚染問題が改善されたとしても、現状の処理方式では一酸化二窒素発生は増加し続け、地球温暖化問題は改善されない。廃水処理設備よりの一酸化二窒素発生と地球温暖化との因果関係が明らかならば、この対策を行わないことは不作為の責任と言える。

今後、炭素繊維法水処理システムによる有機物、窒素酸化物の処理効果向上と、廃水処理設備からの一酸化二窒素発生削減が、広く認識され普及することにより、水質汚染対策と地球温暖化防止の両方の環境問題に貢献することができるであろう。

７．参考文献

１）Mitigation of nitrous oxide (N_2O) emission from swine wastewater treatment in an aerobic bioreactor packed with carbon fibers,
Takahiro YAMASHITA, Ryoko YAMAMOTO-IKEMOTO, Hiroshi YOKOYAMA, Hirofumi KAWAHARA, Akifumi OGINO, Takashi OSADA, Animal Science Journal, In Press, 2015

２）Carbon Fiber as an Excellent Support Material for Wastewater Treatment Biofilms
Shinya Matsumoto, Akihito Ohtaki, Katsutoshi Hori
Environmental Science & Technology , 2012, 46 (18)

３）炭素繊維水利用技術設計指針
The Guideline for CarbonFiber water Purification technology,
CarbonFiber Make Water Method Association 2017