

Core Mechanism of Action ENGLISH (Doctoral-Level)

Our tri-phasic remediation platform operates through the deliberate integration of three synergistic and reactive phases: (1) gas-phase nanobubbles with high oxidative capacity, (2) a liquid-phase medium for directed mass transport, and (3) catalytically active solid-phase nanoparticles. Once injected into contaminated geological matrices, these components coalesce into a reactive nanoscale colloidal cloud capable of initiating multi-pathway in situ redox reactions.

Nanobubbles act as submicron-scale chemical microreactors, substantially increasing the interfacial surface area across gas-solid and gas-liquid domains. Catalysts—typically engineered metal oxides or nanozymes facilitate electron transfer, enhance the formation of reactive oxygen species (ROS), and selectively—activate the molecular structure of persistent pollutants. These processes are further intensified by external energy sources, including ultraviolet irradiation (UV-A/C), magnetic field alignment (to enhance spin and charge orientation), and electrochemical potential gradients (to drive interfacial electron flow).

The result is localized mineralization and decomposition of recalcitrant organic contaminants such as aliphatic and aromatic hydrocarbons, phenolic derivatives, organosulfur compounds, and similar pollutants converting them into environmentally benign products like carbon dioxide (CO₂), water (H₂O), and stable—mineral salts.

فارسی (سطح دکتری، علمی و تخصصی) سازوکار هسته‌ای عملکرد

پلتفرم سه‌فازی احیایی ما بر مبنای ادغام هدفمند و واکنش‌پذیر سه فاز طراحی شده است: (۱) نانوحباب‌های گازی با ظرفیت بالای اکسیداسیون، (۲) فاز مایع برای انتقال جرم هدفمند، و (۳) نانوذرات جامد با فعالیت کاتالیزوری. با تزریق این سامانه به ماتریس‌های زمین‌شناسی آلوده، اجزای آن به صورت یک ابر نانویی همگن سازمان می‌یابند که قادر است واکنش‌های اکسایش-کاهش چندمسیره‌ای را به صورت درجا (in situ) آغاز کند.

نانوحباب‌ها به منزله رآکتورهای شیمیایی زیرمیکرونی عمل کرده و سطوح تماس بین فازهای گاز-مایع و گاز-جامد را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند. کاتالیزورها (مانند اکسیدهای فلزی مهندسی‌شده یا نانوآنزیم‌ها) انتقال الکترون، تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و فعال‌سازی ساختار مولکولی آلاینده‌های پایدار را تسهیل می‌کنند. این فرایندها با بهره‌گیری از منابع انرژی خارجی مانند تابش فرابنفش (UV-A/C)، میدان مغناطیسی (برای هم‌راستاسازی اسپین و بار) و شیب‌های پتانسیل الکتروشیمیایی (برای تحریک جریان الکترونی در سطح تماس) تشدید می‌شوند.

در نهایت، این سازوکار موجب تجزیه و معدنی‌سازی موضعی آلاینده‌های آلی پایدار نظیر هیدروکربن‌های آلیفاتیک و آروماتیک، مشتقات فنول، ترکیبات گوگردی و سایر ترکیبات مقاوم شده و آن‌ها را به محصولات بی‌خطر زیست‌محیطی از جمله دی‌اکسید کربن (CO₂)، آب (H₂O) و نمک‌های معدنی پایدار تبدیل می‌کند.

العربية (مستوى دكتوراه) الآلية الأساسية للتفاعل

تعتمد منصتنا ثلاثية الأطوار للمعالجة البيئية على التكامل التفاعلي بين ثلاث مراحل متداخلة: (۱) فقاعات نانوية غازية ذات قدرة عالية على الأكسدة، (۲) وسط ناقل سائل يتيح النقل المستهدف للكتلة، و(۳) جسيمات نانوية صلبة فعالة

تحفيزيًا. عند حقن هذا النظام في الطبقات الجيولوجية الملوثة، تتنظم هذه المكونات تلقائيًا لتشكّل سحابة نانوية تفاعلية قادرة على إطلاق تفاعلات اختزال/أكسدة متعددة المسارات داخل الموقع (in situ).

تعمل الفقاعات النانوية كمفاعلات كيميائية دقيقة، مضاعفةً بشكل كبير مساحة التماس بين الأطوار الغازية والسائلة والصلبة. تُعزز المحفزات (غالبًا أكاسيد معدنية مصممة أو إنزيمات نانوية اصطناعية) عمليات نقل الإلكترونات، وتُسرع إنتاج أنواع الأوكسجين التفاعلية (ROS)، وتُفعّل البنية الجزيئية للملوثات المقاومة بشكل انتقائي. تُكثّف هذه التفاعلات بفعل مصادر طاقة خارجية تشمل الأشعة فوق البنفسجية (UV-A/C)، والحقول المغناطيسية (لتوجيه الشحنات)، وفروقات الجهد الكهروكيميائي (لدفع تدفق الإلكترونات على السطح البيني).

تُفضي هذه العمليات إلى تفكك وتحويل موضعي للملوثات العضوية المعقدة مثل الهيدروكربونات الأليفاتية والعطرية، المشتقات الفينولية، المركبات الكبريتية، والسموم المماثلة إلى نواتج نهائية خاملة ومستقرة بيئيًا مثل ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، الماء (H_2O)، والأملاح المعدنية الثابتة.