

微生物群のデザイン化による 高効率型環境バイオ処理技術開発

実施期間:平成19年度～平成23年度

プロジェクトの概要(公開)

平成24年4月19日

NEDO バイオテクノロジー・医療技術部

01/45

発表内容

公開

- I 事業の位置付け・必要性
- II 研究開発マネジメント
- III 成果
- IV 実用化の見通し

NEDO
(長谷川)

藤田プロジェクト
リーダー(PL)

02/45

社会的背景

○日本の課題

環境負荷の低減と省エネルギー化の促進による循環型産業社会の構築

○必要な技術開発

モノ作りとその後処理

(バイオマス・ニッポン総合戦略：廃棄物系バイオマスの利用促進)

○処理方法の技術的課題

エネルギー多消費、廃棄物多排出

03/45

微生物群デザイン化への経緯

微生物による環境浄化の開始

→環境因子の操作で微生物群集の優先化を制御

よりきめの細かな微生物群集の制御法

→SRT制御(汚泥滞留時間)や、アンモニア酸化などに効果

より安定した制御法が実用段階へ

→グラニュール、固定化、膜分離の導入

デザイン化技術の開発

→微生物の構成・空間配置等の制御



04/45

デザイン化技術の定義

『微生物群の構成や配置等を 人為的に制御する技術』

- 微生物構成の制御
- 微生物群の空間的配置の制御
- 微生物コミュニティの制御

05/45

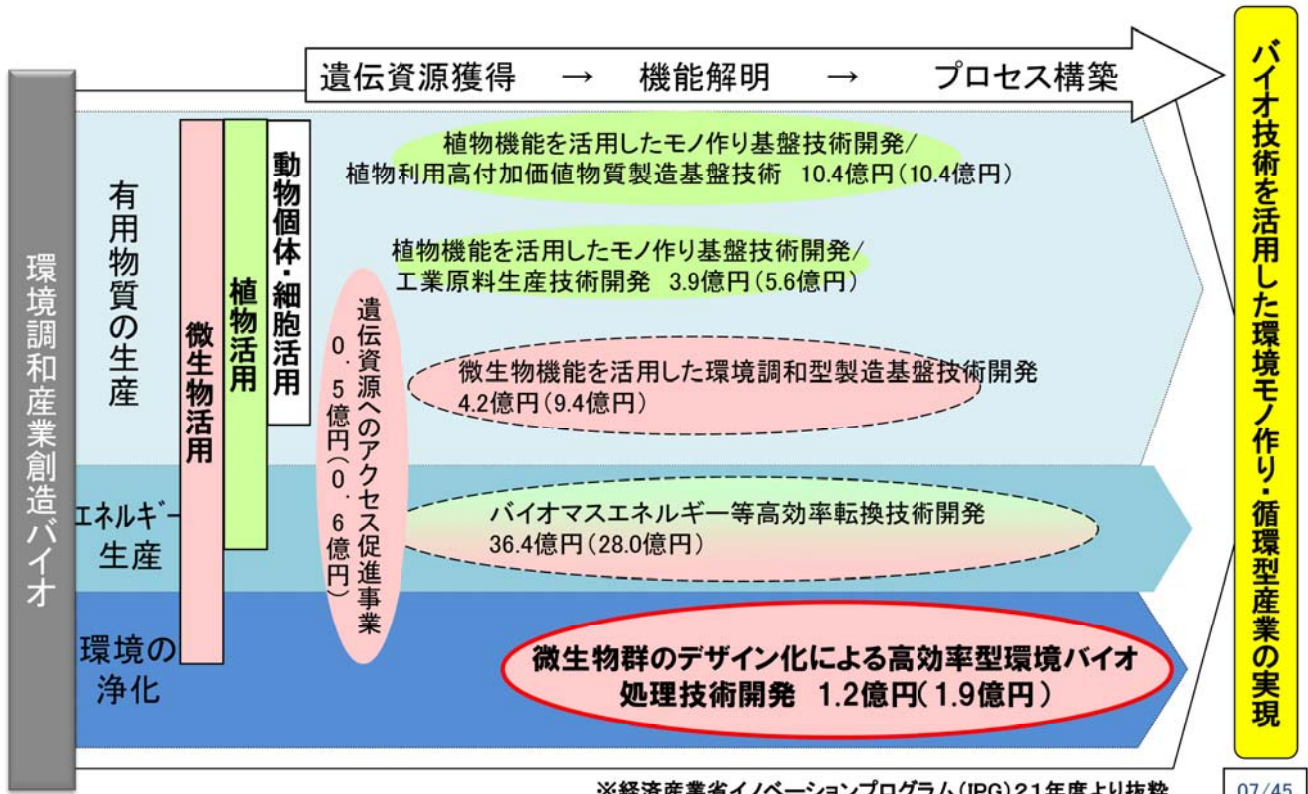
事業の目的

微生物群の**デザイン化技術**を開発することにより、**省エネルギー効果が大きく、廃棄物を大幅に削減する**

高効率型廃水・廃棄物等処理の**基盤技術**を確立する

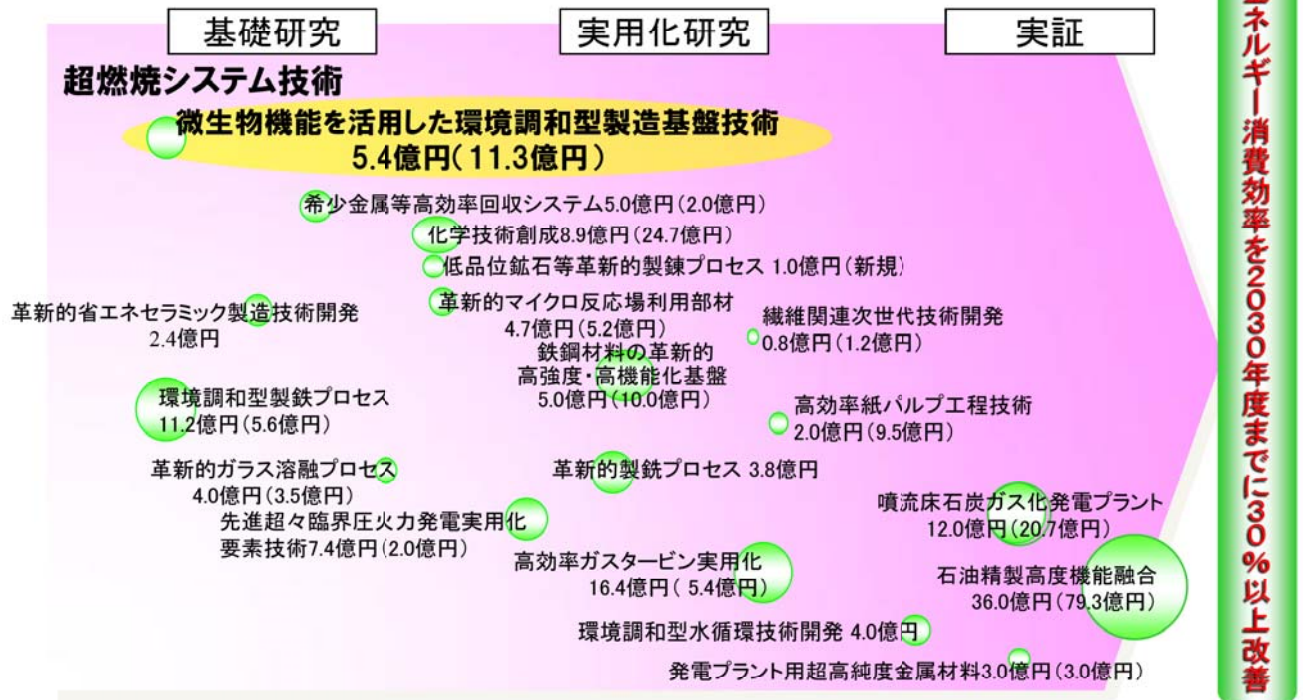
06/45

環境・安心イノベーションプログラムでの位置付け

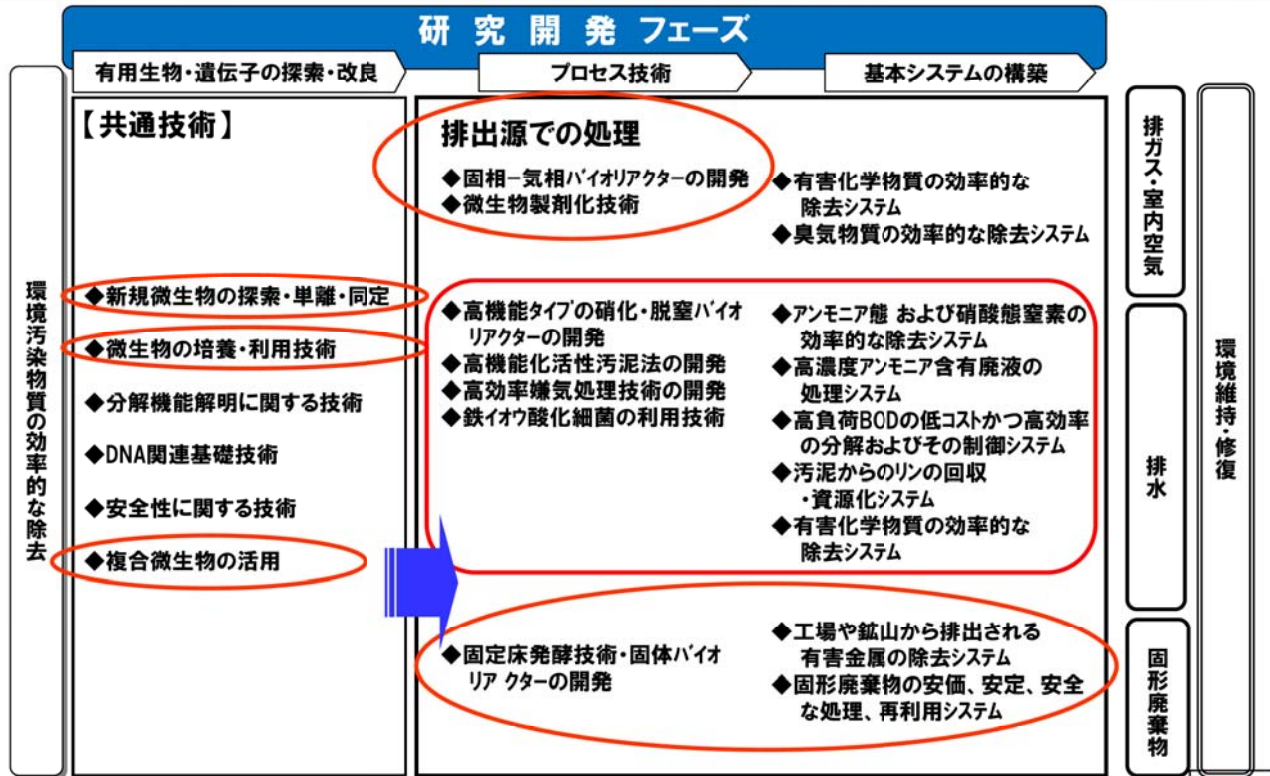


エネルギー・イノベーションプログラムでの位置付け

①総合エネルギー効率の向上



生物機能活用技術分野の技術マップでの位置付け



※生物機能活用技術分野の技術戦略マップ(2009)より抜粋

09/45

NEDOが、関与する意義

○産学官の連携体制が必要

微生物による廃水・廃棄物処理技術は頭打ち（エネルギー多消費）

- 微生物群自体はブラックボックス(基盤技術が未確立)
- 基盤技術を大学で開発し企業へフィードバック

○日本オリジナルの技術として、産業の高度化へ大きく貢献

デザイン化技術が確立できれば、現行の静脈産業の問題点を解決

- 日本オリジナルのプラットフォーム型技術を創出
- 基本特許の取得が世界に先駆けて可能
- 静脈産業の抜本改革による産業の高度化



NEDOの事業委託が適切

10/45

実施の効果の前提

○対象となるバイオマス

家畜排せつ物：約8,900万トン

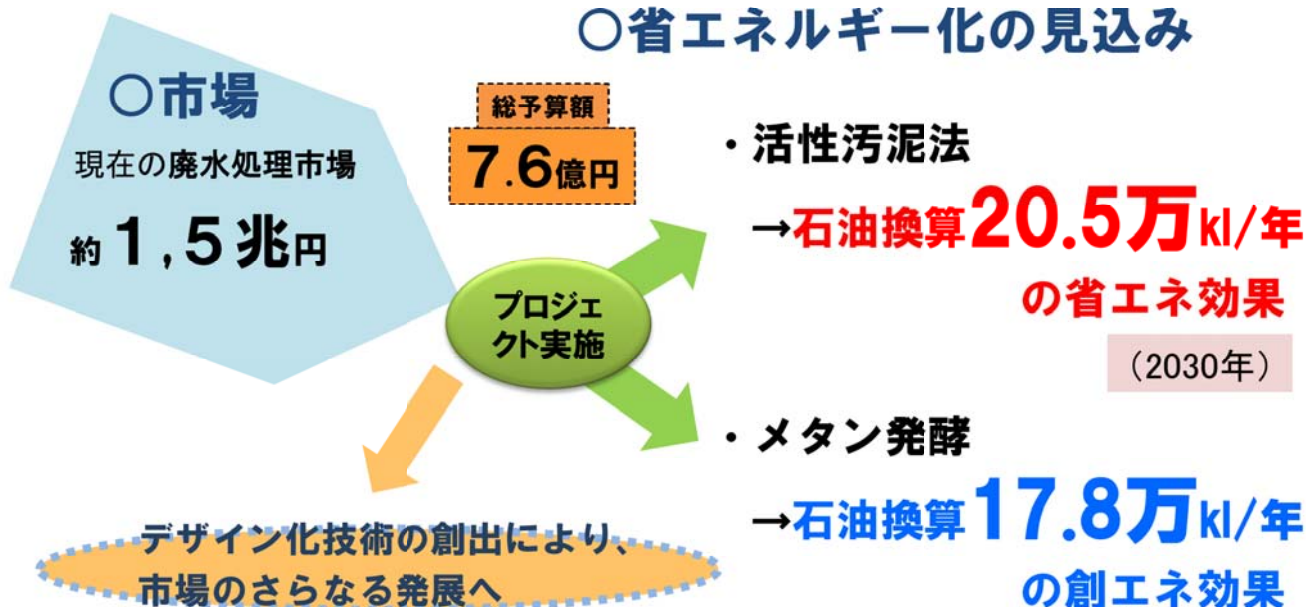
食品廃棄物：約2,200万トン

下水汚泥：7,500万トン（濃縮汚泥ベース）

（バイオマス・ニッポン総合戦略平成18年3月31日より）

実施の効果（費用対効果）

○省エネルギー化の見込み



- I 事業の位置付け・必要性
 - II 研究開発マネジメント
 - III 成果
 - IV 実用化の見通し
- NEDO
(長谷川)
- 藤田PL

13/45

最終目標(好気性微生物処理)

◎有用微生物群を人為的に安定的導入・維持する技術の開発

- ・ 従来の標準活性汚泥法の処理プロセス等の
約3倍の高効率化
これによる**エネルギー使用量の約2/3の削減**を実現
- ・ 検証可能なテストプラント規模にて評価

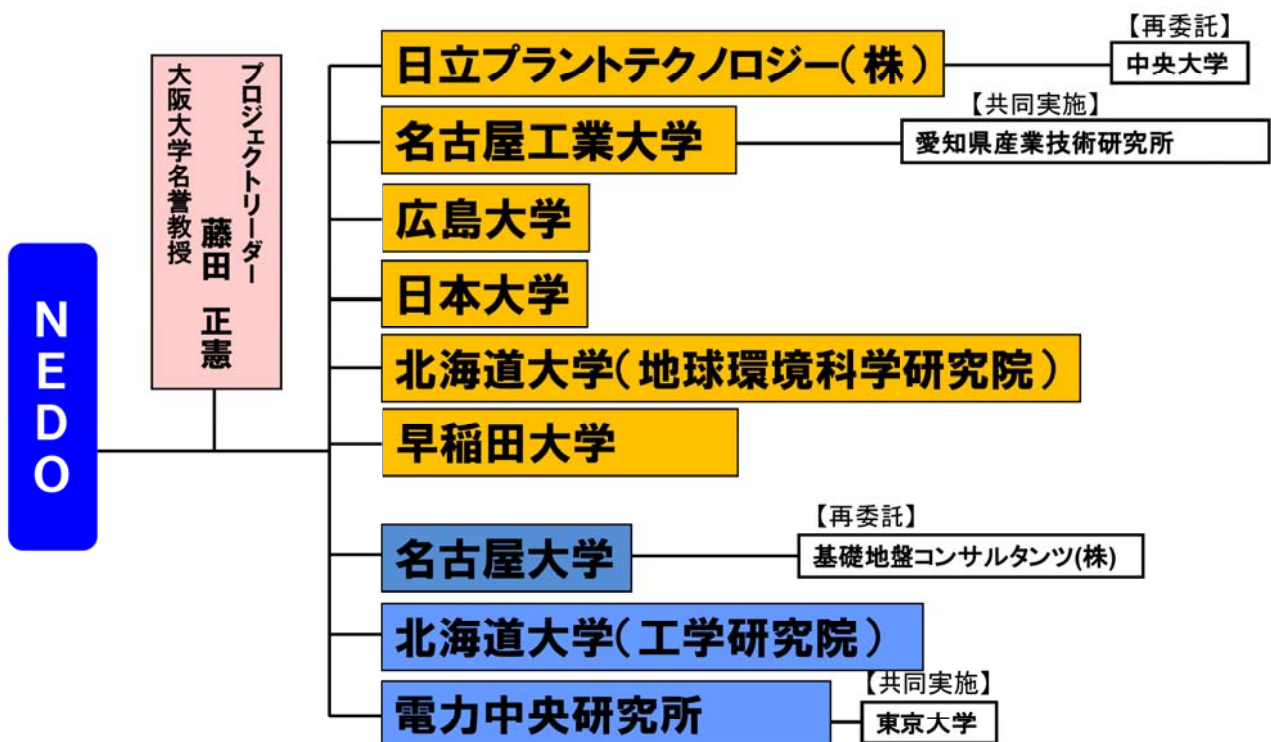
14/45

最終目標(嫌気性微生物処理)

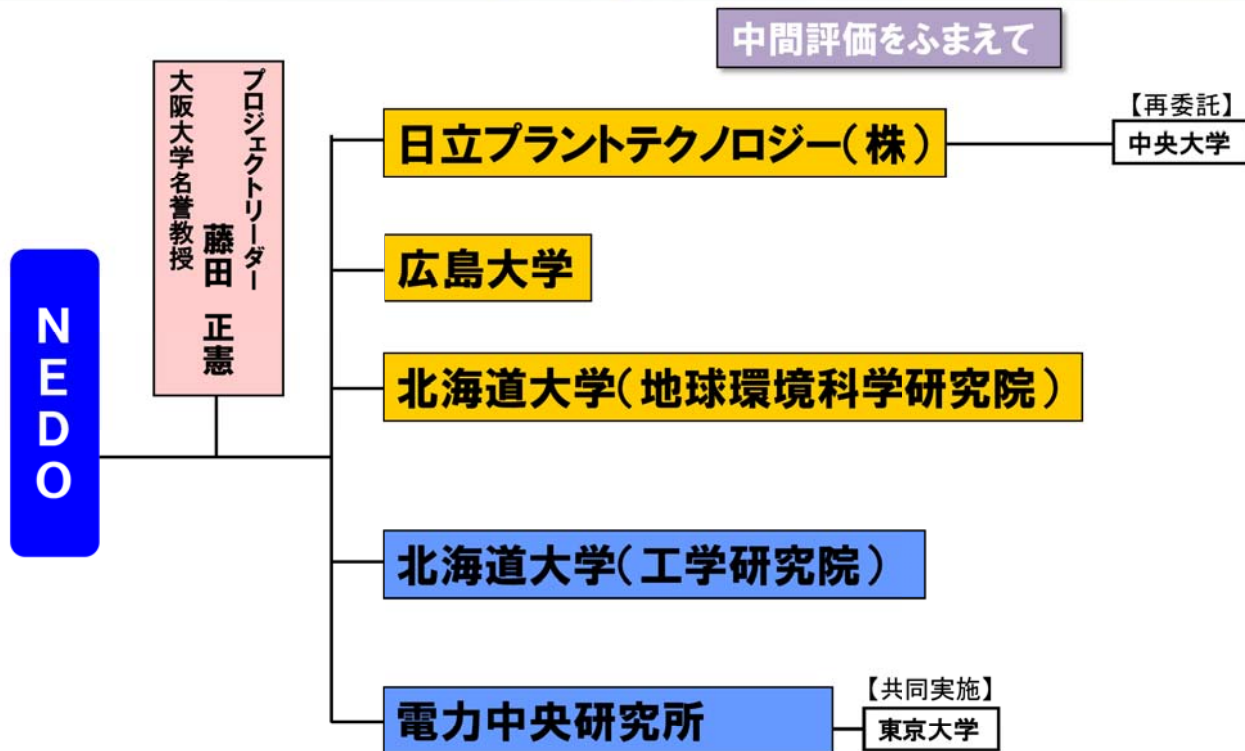
◎有用微生物群を人為的に空間配置させ 安定的に維持・優占化するための技術の 開発

- ・従来のメタン発酵槽容積に比べて、**約50%のコンパクト化**によりシステム効率の向上を実現
- ・従来のメタン発酵法では対応が困難であった性状・組成の有機性廃棄物の種類への適用拡大

研究開発の実施体制(H.19-21年度)



研究開発の実施体制(H.22-23年度)



研究開発計画(内容・スケジュール・予算)

(単位:百万円)

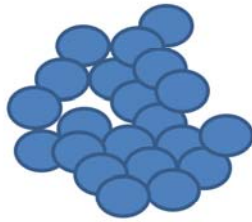
年度	2007	2008	2009	2010	2011	2012	
有用微生物群の選抜と特性評価							
有用微生物群の特性・機能評価	→						
有用微生物群の安定的導入・維持			中 間 評 価			事 後 評 価	
デザイン化技術の開発							
微生物群の処理機能の技術的有効性評価	→						
微生物群の処理機能の技術的有効性評価							
バイオエンジニアリング技術の開発							
バイオエンジニアリング技術の開発							
デザイン化微生物群の総合評価							
デザイン化微生物群の総合評価							
開発予算	188	192	171	108	101	760	

上段は好気性、下段は嫌気性。

2012年度の欄は合計額

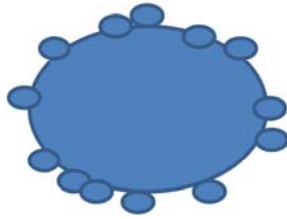
デザイン化技術例

公開



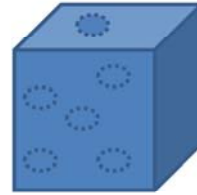
グラニュール

北大-工



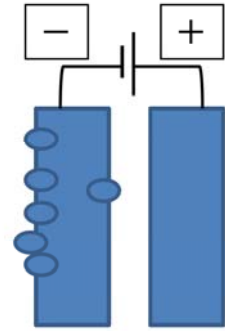
付着

広島大学 北大-地



包括固定化

日立PT

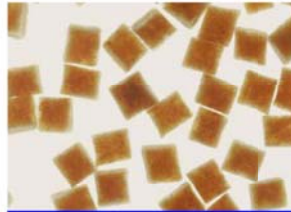


電気制御

電力中央研究所



アナモックスグラニュール



包括固定化担体



通電型発酵槽

公開

研究開発内容

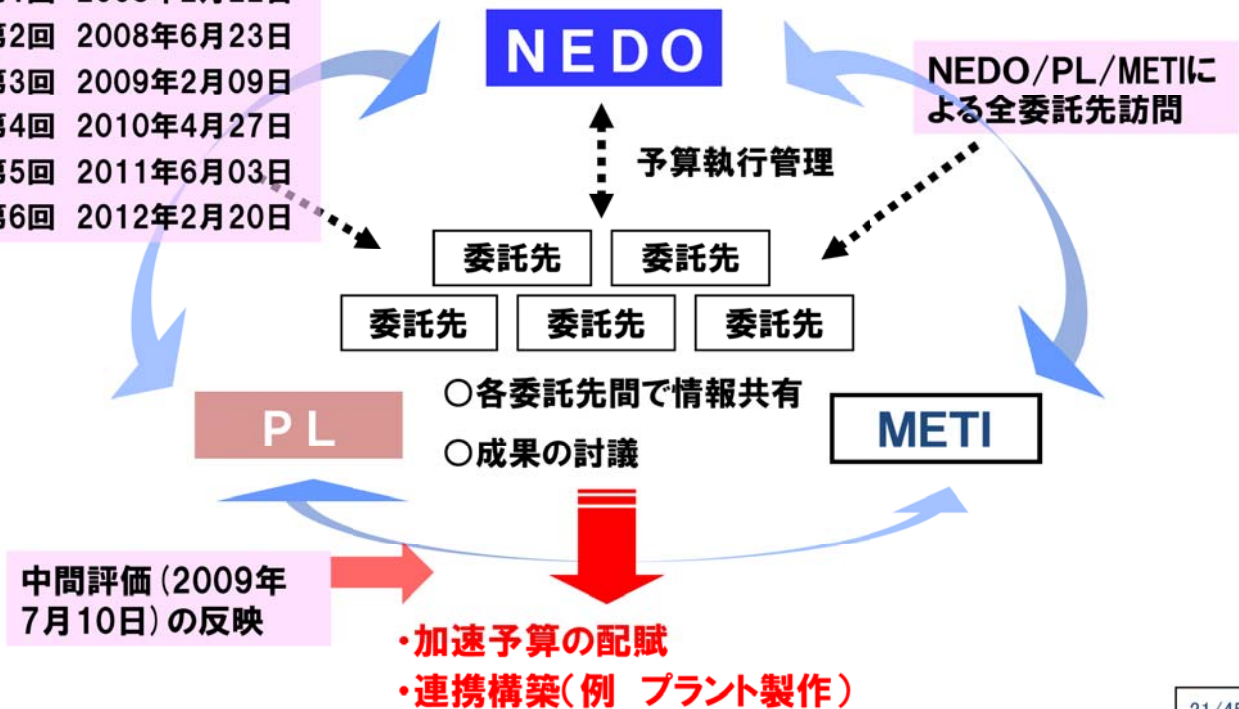
日立PT	好気性処理				
	微生物(群)の選抜と特性評価	微生物群の安定的維持	微生物群の処理機能の評価	バイオエンジニアリング技術の開発	デザイン化微生物群の総合評価
広大					
北大-地					

北大-工	嫌気性処理				
	微生物(群)の特性と機能評価	デザイン化技術の開発	微生物群の処理機能の評価	バイオエンジニアリング技術の開発	デザイン化微生物群の総合評価
電中研					

NEDOのマネジメント (1)

【研究開発委員会】

- 第1回 2008年2月22日
- 第2回 2008年6月23日
- 第3回 2009年2月09日
- 第4回 2010年4月27日
- 第5回 2011年6月03日
- 第6回 2012年2月20日



NEDOのマネジメント (2)

— 連携構築 —

仮想プラントの提案

日立PT、電中研、北大-工、北大-地、広大

— 微生物の寄託依頼 —

成果物としての微生物の寄託依頼

産業上有用な微生物をNITE (NBRC) への寄託を依頼

中間評価への対応(1)

公開

今後に対する提言	対 応
<p>本プロジェクトに課せられた当初の2大最終目標に相応する研究課題ごとの目標を設定①し、その上で残された期間の研究開発を遂行し、実用化を含む成果に達することが望まれる。また、本プロジェクトの開発成果②が日本発のオリジナル技術として実を結び、問題を抱える新興国はもとより、開発公害途上国の下廃水・廃棄物処理等のインフラ整備にも貢献できるよう期待したい。</p>	<p>①本技術開発の大きな目標に沿って、実用化を目指す課題、基礎技術の開発を目指す課題、あるいは微生物デザイン化に資する学術的課題に適した具体的な目標を設定し、残り2年間で課題ごとに研究を集大成している。</p> <p>②まず、個々の課題の成果を重視しつつ、それが水処理分野でどのように貢献するかをミーティング等で議論し、一例として有機性廃棄物や下・排水等を対象とした「想定される省エネ・高効率型環境バイオ処理システム」として、実現可能なシステムを提案している。また、個々のバイオ処理システムあるいはそれらの総合化システムは、省エネ型かつ高効率型であることから、技術・価格の両面で国際競争力を備えていると自負しており、先進国のみならず新興国・開発途上国でも十分に採用されうる技術であり、インフラ整備等に貢献しうると考える。</p>

23/45

中間評価への対応(2)

公開

今後に対する提言	対 応
<p>本プロジェクトにおける有用微生物の探索の研究、装置の開発、制御の研究について、それぞれの知見を上手く組み合わせることが重要である。実用化を見据えて現実性のある組合せ③を優先し、研究開発を進めていく欲しい。また、微生物によるバイオ処理技術に関しては多くの知見や実績があり、他の技術との優位性④を明らかにしておく必要がある。</p>	<p>③中間評価の結果等から、9課題すべてを維持することが困難と判断され、選択と集中により主として有機性廃棄物および下・排水処理を対象としつつ、かつより実用化ならびに新規技術の開発につながるテーマに絞り、ラストパートをかけた。その結果、例えば「想定される省エネ・高効率型環境バイオ処理システム」につながり、また資源回収の視点からの低コストかつ省エネ・高効率焼回収システムのパイロット試験につながった。</p> <p>④省エネ・高効率の点で、これまでの技術を十分に超えており、バイオ処理における技術的・价格的な優位性は極めて高いと考えている。</p>

24/45

中間評価への対応(3)

公開

今後に対する提言	対応
本プロジェクトの終了時には、微生物群の機能が依然として ブラックボックス⑤ のままであってはならず、物質分解やバイオガス化の著しい高速化の理由等を十分に説明することが望まれる。	⑤完全に微生物群の機能を解明したとは言えないが、5年前に比べ、例えばアンモニア酸化では硝酸化を抑制すること、即ち亜硝酸酸化細菌とアンモニア酸化細菌の個別制御が困難であったのが、本プロジェクトでは実用レベルでアンモニア酸化細菌が優先な微生物群を作り上げ、亜硝酸型アンモニア酸化が可能になったことは学術的、技術的に進歩したと考えている。その他、バイオフィルム工学の発展による新たな微生物共生系の構築、アナモックス細菌のメタゲノム解析からの新知見による速度向上の可能性など、本プロジェクトでの成果は微生物群の制御に学術的にも貢献したと考える。

25/45

公開

追加的資金(加速資金)配分

実施者	時期	金額 (百万円)	内容	結果
日立PT	平成21年度	42	亜硝酸硝化プロセスの試験プラント作製	幅広いアンモニア濃度の流入水を対象として、亜硝酸型硝化反応の長期安定処理性能を評価。低濃度アンモニア廃水(NH ₄ -N80mg/L)の長期亜硝酸型硝化に世界で初めて成功
電中研	平成21年度	7	固定床メタン発酵に及ぼす阻害物質の影響評価の加速	実廃棄物処理時に生じるアンモニアが固定床メタン発酵に及ぼす影響を明らかにすることができた
北大-地	平成21年度	3	バイオフィルム工学による活性汚泥法の効率化・安定化の加速	目標であるバイオフィルム工学によるアンモニア酸化細菌の活性促進ならびにその分子機構の解明に成功した
北大-工	平成21年度	4	アナモックスリアクター作製	実廃水をアナモックスプロセスで処理することができ、高い窒素除去速度(6.0 kg-T N m ⁻³ day ⁻¹)を達成した
広大	平成22年度	35	DHSリアクタープラント作製	実下水を用いて実用化に向けた検討を行うことができた

上記以外に、中間評価時まで、日立PT、北大(工)へ加速資金を配分

26/45

- I 事業の位置付け・必要性
 - II 研究開発マネジメント
 - III 成果
 - IV 実用化の見通し
- NEDO(長谷川)
- 藤田PL

3. 研究開発成果について (1)最終目標の達成度

目標の達成度 好気性処理

	従来	最終目標	成果	達成度
亜硝酸硝化 (日立PT)	・曝気された酸素の25%を 亜硝酸酸化が消費 (BOD/N比1未満)	亜硝酸型硝化により、通 常の硝化工程に必要な 酸素消費量25%を削減	・消化脱水ろ液(NH ₄ -N 1,000mg/L) の亜硝酸型硝化に成功 ・同希釈液(NH ₄ -N 80mg/L)のpH ショック法による亜硝酸型硝化に成功 (酸素消費量25%削減) ・亜酸化窒素発生抑制に成功	◎
バイオフィルム 工学 (北大-地)	無し	バイオフィルム工学による 活性汚泥法の効率化・安 定化	アンモニア酸化細菌 <i>Nitrosomonas europaea</i> の活性を2.5倍向上させる バイオフィルムの形成に成功し、 その原因を遺伝子レベルで特定す ることに成功 <i>N. europaea</i> を活性化する新規細菌 を発見した。Anammox細菌につい て、主要膜タンパク質を同定	○
DHSリアクター (広大)	・活性汚泥法+従来法 リン回収コスト	・DHSリアクターを用いた リン濃縮技術の開発	・DHSリアクターによる人工排水中のリン 濃縮(32倍に濃縮)	○

達成度:◎は大幅に達成、○は達成を示す。

目標の達成度 嫌気性処理

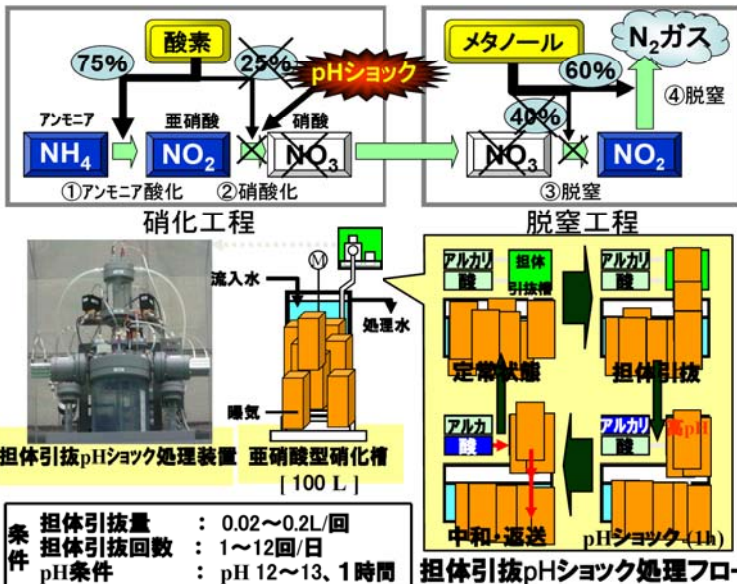
	従来	最終目標	成果	達成度
微生物群集の電気制御 (電中研)	日平均容積効率 (有機物負荷量): 8.5 kgCOD/m ³ /日	従来の設備を50%にコンパクト化	模擬廃棄物で最大有機物負荷量 89.3 kgCOD/m ³ /日 (約21%にコンパクト化)	◎
ANAMMOXプロセスの最適条件の検討 (北大-工)	従来の硝化脱窒 1-2 kg-N/m ³ /day	高効率の部分硝化- Anammoxプロセスの開発	二段ステップ流入式上向流バイオフィルムリアクターを構築 最大窒素除去速度34.2 Kg-TN/m ³ /dを達成した。この値は、従来の硝化-脱窒法と比較して約30倍高い速度	◎

達成度: ◎は大幅に達成、○は達成を示す。

成果の概要 (日立PT)

曝気量とメタノール添加量の削減需要が見込まれる消化汚泥脱水ろ液、産業排水処理に向けて、硝酸化抑制技術を用いた窒素除去システムを開発。

- 技術の特長
- (1) アルカリ溶液への担体浸漬(pHショック)で硝酸生成を抑制
 - (2) アナモックスの前処理としても利用可能



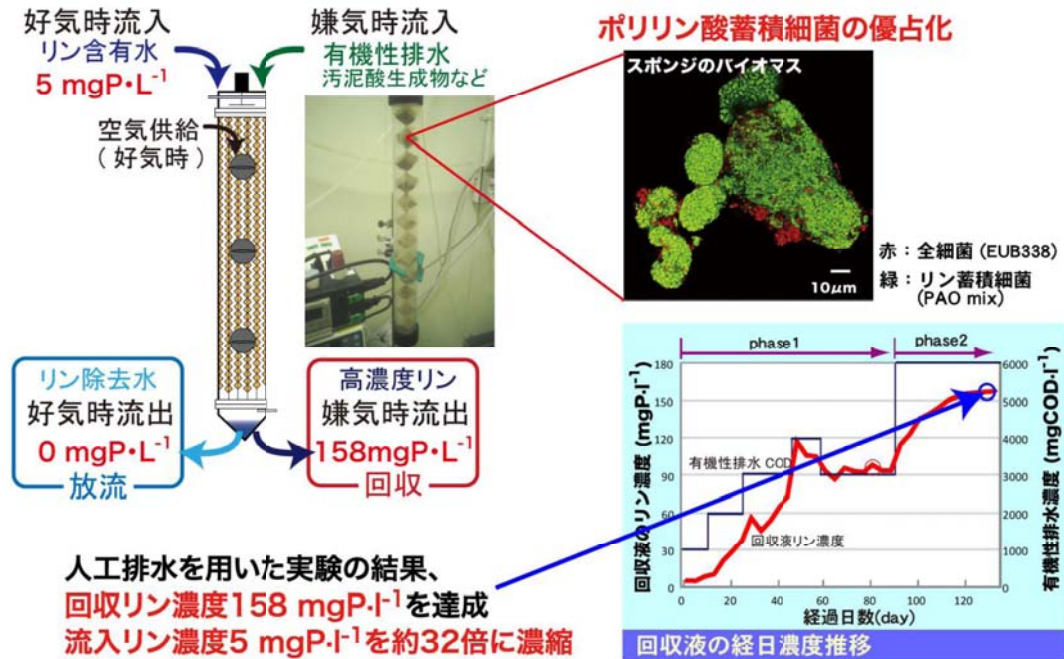
効果

- 亜硝酸型硝化で 曝気量25%削減
- 適用アンモニア濃度範囲拡大 (NH₄-N 80~1,000mg/L)
- アナモックス処理の前段として利用可能
- GHG(亜酸化窒素)の発生抑制可能に

成果の概要(広大)

公開

密閉型DHSによる新規なリン回収(特願2009-044797)



余剰汚泥レス排水処理システムからのリン回収

31/45

成果の概要(北大-地)

公開

【成果1】アンモニア酸化細菌群のデザイン化

AOB をバイオフィルム化し、活性汚泥細菌 (*Rheinheimera* 属) を共存させること(微生物群デザイン化)によって、アンモニア処理活性を2~3倍程度上昇させることに成功した。

【成果2】原油汚染土壌浄化細菌のデザイン化

ナフタレン分解細菌をバイオフィルム化することで分解持続性を大幅に拡大(効率化)することに成功した。

【成果3】植物-根圏細菌群のデザイン化

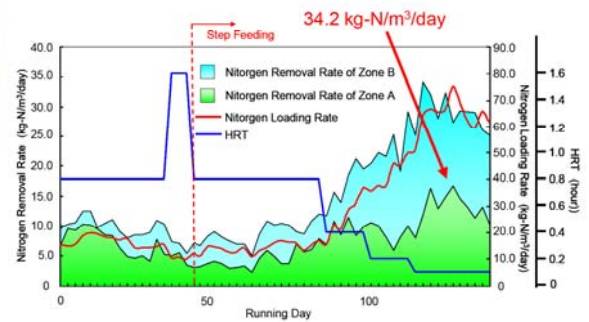
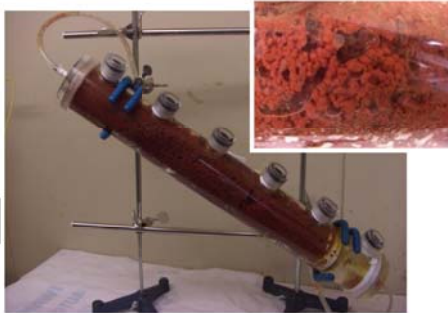
根圏バイオフィルム工学により、持続的水質浄化と植物の生育促進を同時に実現することに成功した。(世界初!)

Acinetobacter calcoaceticus P23

成果の概要(北大-工①) 公開

研究項目	成果概要
①人工廃水を処理する部分硝化-ANAMMOX並列リアクターの開発	部分硝化-ANAMMOX並列型リアクターを作成この時のANAMMOXリアクターの最大窒素除去速度15.0 Kg-TN/m ³ /dを達成した
②部分硝化プロセスの最適条件の検討	②NH ₂ OH(濃度250 μM)を添加することで、迅速かつ安定的な部分消化反応を立ち上げることに成功
③ANAMMOXプロセスの最適条件の検討	③二段ステップ流入式上向流バイオフィームリアクターを構築した。最大窒素除去速度34.2 Kg-TN/m ³ /dを達成した。この値は、従来の硝化-脱窒法と比較して約30倍高い速度

高効率部分硝化-
Anammoxリアクター
の開発

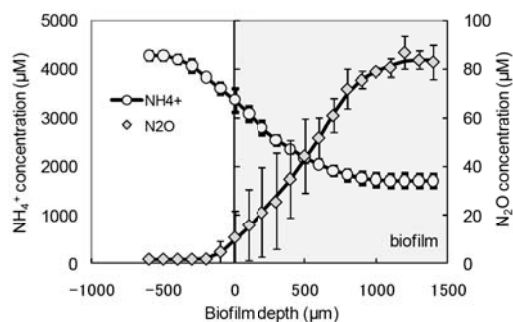
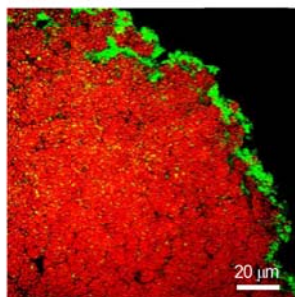


事業原簿Ⅲ-2-4.
33/45

成果の概要(北大-工②) 公開

研究項目	成果概要
④分子生物学的手法およびマイクロセンサーによる微生物群集解析	④部分消化リアクターおよびANAMMOXリアクター内に存在する微生物群集構造を16S rRNA遺伝子解析およびFISH法により解析した。In Situ ANAMMOX活性を微小電極で測定
⑤ANAMMOX細菌のメタゲノム解析	⑤Ca. B. sinicaの完全長に近いゲノム配列の再構築に成功した。プロテオーム解析を行い、新規窒素代謝経路を発見
⑥実廃水を用いた実証試験 (Anammoxプロセスのみ)	⑥消化汚泥脱離液をAnammoxプロセスで処理した。窒素除去速度約6.0 kg-TN m ⁻³ day ⁻¹ を達成

Anammoxグラニュールの
微生物群集構造とin situ
N₂O濃度プロファイル



事業原簿Ⅲ-2-4.
34/45

成果の概要(電中研①)

公開

生ごみなど固形有機廃棄物のメタン発酵処理

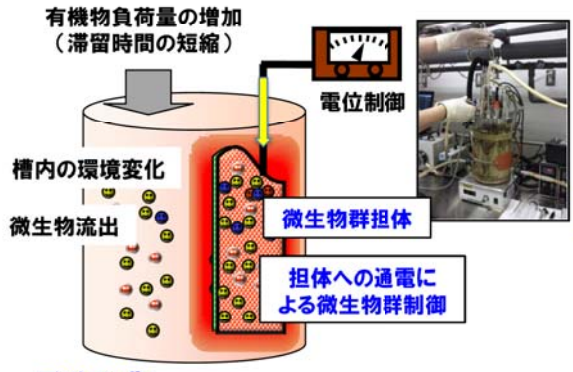
電力中央研究所 共同実施先: 東京大学

技術開発
 ・担体の効果
 ・発酵槽内の通電の効果
 ・担体と通電制御の組合せによる効果

高い有機物負荷量での安定化
 (短い水理学的滞留時間)

発酵槽
 効率化・コンパクト化

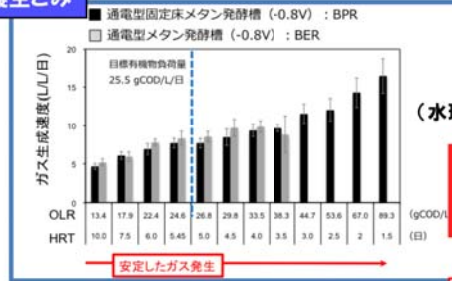
通電型固定床メタン発酵槽の開発



デザイン化
 微生物群集+担体+通電による制御

通電型固定床メタン発酵槽 事業原簿Ⅲ-2-5.

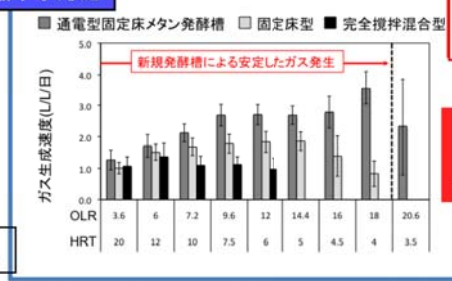
模擬生ごみ



最大負荷量:
 89.3gCOD/L/日
 (水理学的滞留時間1.5日)

目標負荷量以上で
 (25.5gCOD/L/日)
 安定処理

濃縮下水汚泥



既設設備
 3倍以上の効
 率化を達成

既設設備に対して
 負荷量約4.5倍
 約36%にコンパクト化

35/45

成果の概要(電中研②)

公開



通電型メタン発酵槽

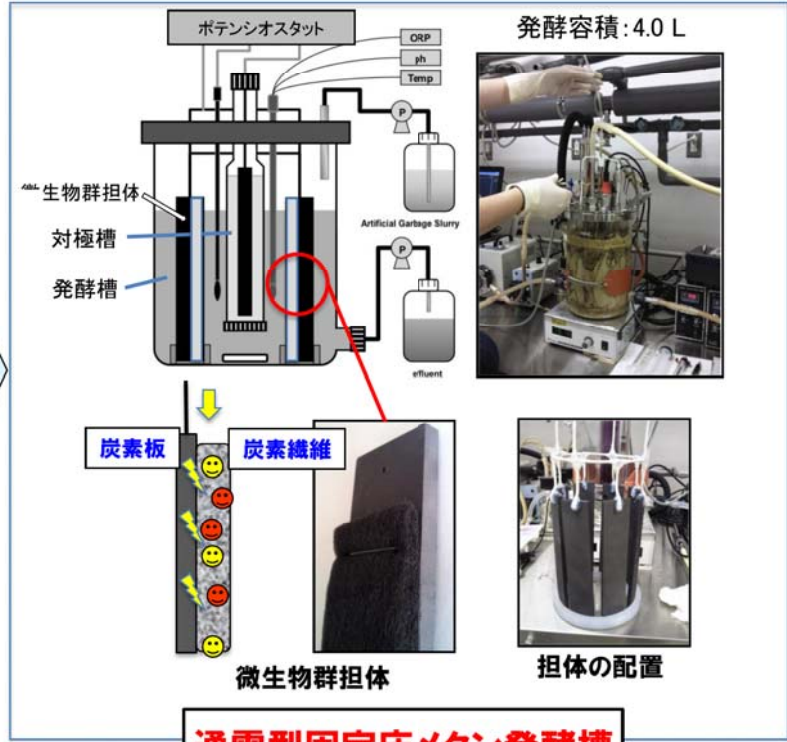
+



微生物群担体
 (炭素繊維)
 (PE繊維)

固定床メタン発酵槽

事業原簿Ⅲ-2-5.



通電型固定床メタン発酵槽

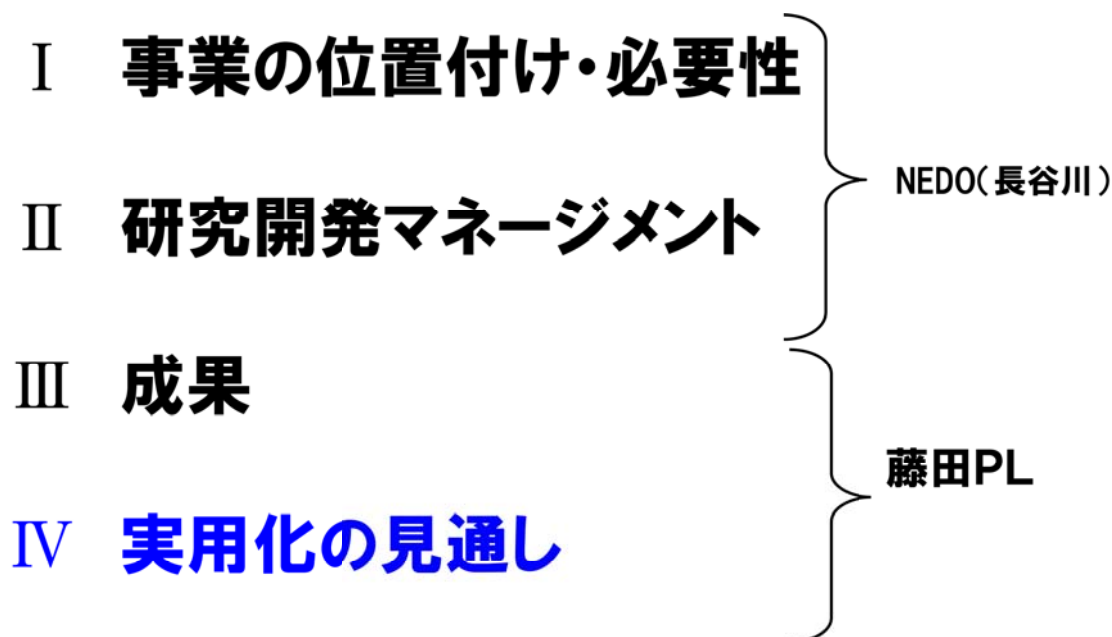
36/45

(3) 知的財産権、成果の普及

	特許出願	新聞・ 雑誌等掲載	受賞実績	口頭発表	論文発表		合計
	国内出願				査読付き	その他	
電中研	5	3		9	8	1	26
北大工			7	26	6	1	40
北大地	1		1	71	18	7	98
広島大学	1		1	34	4	1	41
日立PT				8	1		9
合計	7	3	9	148	37	10	214

37/45

発表内容



38/45

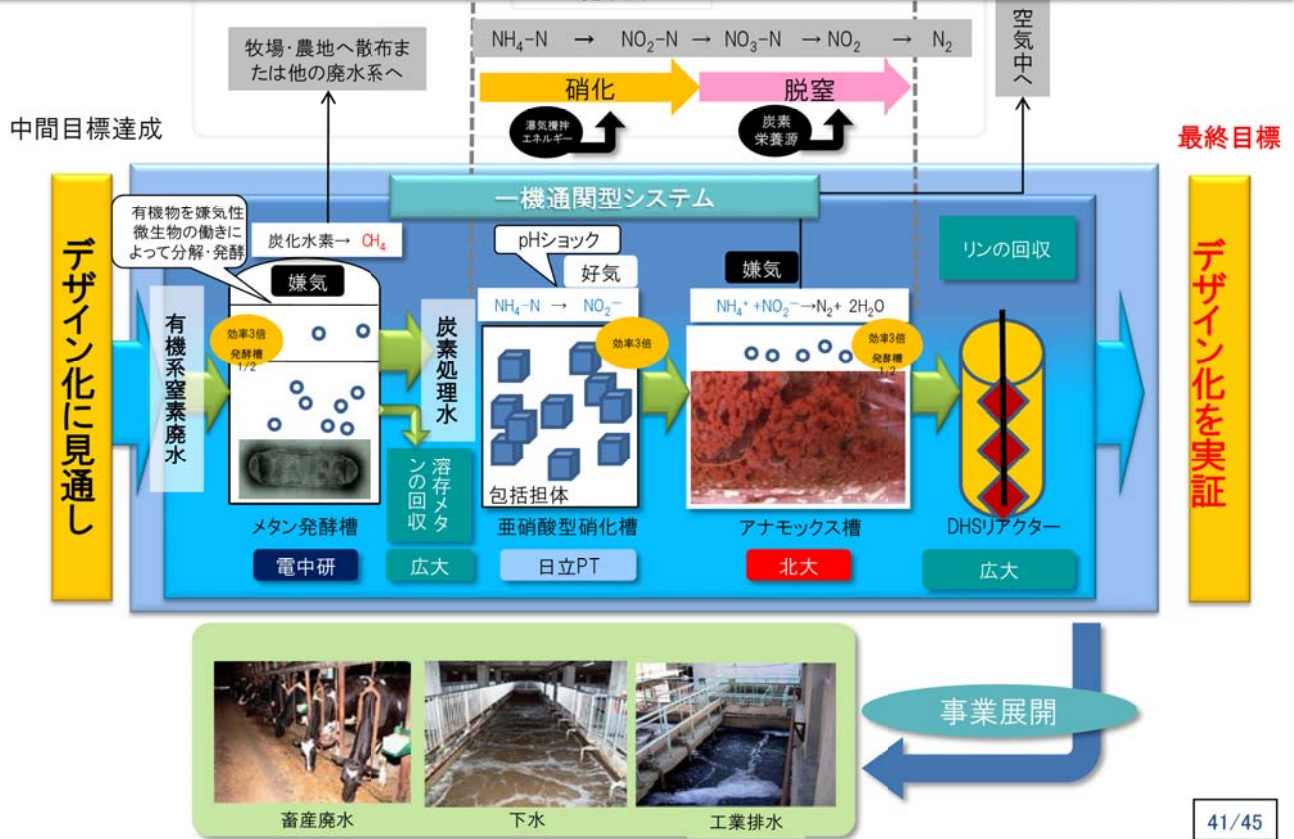
実用化イメージ(好気性処理)

実施者	キーテクノロジー	対象物
日立PT	包括固定化担体、pHショック法	高濃度アンモニア廃水(下水処理施設:消化脱水ろ液、産業廃水処理施設、畜産廃水処理施設)に適用
広大	高濃度微生物保持技術	下・排水処理における温室効果ガス防止、リン資源回収
北大(地)	バイオフィルム工学	硝化・脱窒法およびANAMMOX法水処理技術、バイオレメディエーション技術

実用化イメージ(嫌気性処理)

実施者	キーテクノロジー	対象物
北大(工)	窒素除去ANAMMOX反応	半導体製造工程廃水、メタン発酵脱離液や製鉄所廃水などからの窒素除去
電中研	微生物群集の電気制御技術	高効率メタン発酵槽による未利用廃棄物(食品廃棄物、下水汚泥など)の処理

想定される実用化イメージ



プロジェクト開発技術の海外に対する優位性 (1)

	世界の技術レベル・開発動向	本プロジェクトの優位性
日立PT	<p>現在、亜硝酸型硝化プロセスの普及は、広がりつつあるアナムモクスプロセスの前段プロセスとして注目され、オランダを中心に広がりを見せており、ドイツ、オーストリア、スイスにおいて適用の報告がなされている。最近の動向では中国においてCANONの大型設備が建設中である。また、2009年からアメリカ、ニューヨーク市において、汚泥脱水ろ液を対象に亜硝酸型硝化プロセスと脱窒プロセスを組み合わせた処理が行われている。</p>	<p>本研究開発技術の特徴は、i)硝化細菌をゲル中に包括固定化した担体を用い、ii) pHショック法によるNOB活性を抑制することにある。本技術はNOB活性抑制のために溶存酸素濃度を下げる必要が無いため、AOB活性を十分に活性化させることが可能となる。従って、処理時間の短縮が図れるため、反応槽容積が小さくなる優位性がある。また、既存の海外技術は処理対象が高濃度アンモニア廃水のみであるのに対し、本研究開発技術は廃水のアンモニア濃度が$\text{NH}_4\text{-N} \geq 80\text{mg/L}$と低い濃度も対象となることから、消化汚泥脱水ろ液以外の比較的濃度の低い産業廃水等への展開が期待できるのと同時に、流入負荷変動による反応槽内遊離アンモニア濃度の急激な減少に伴う硝酸生成活性化の懸念が無いことが大きな優位性となる。また、亜硝酸型硝化反応は地球温暖化ガスである亜酸化窒素が大量に発生すると言われており、pHショック法を適用することによりこれを抑制することが可能な本技術は、海外技術に対して高い優位性を有する。</p>

プロジェクト開発技術の海外に対する優位性 (2)

	世界の技術レベル・開発動向	本プロジェクトの優位性
広大	下水等の処理水に残存している低濃度のリン酸を凝集剤を用い化学的に除去し、回収する方法は提案されているが、化学的な除去・回収はコスト面等の問題から下水処理水に対しては実用化されておらず、この解決には、低コストの微生物を利用した生物学的な方法が考えられる。 しかし、海外において生物学的リン除去・回収の必要性を感じつつも、名案がない状況である。ポリリン酸蓄積細菌を活用して、低濃度のリン酸を除去し高濃度の液として回収しようとする本研究以外に、国内外において生物学的リン除去・回収方法は現在のところ存在しない。	海外では、下水処理水からの生物学的リン除去・回収方法がない状況であり、本研究で開発している技術は、我が国から発信する数少ない水環境技術であり、日本の主導による全世界の水環境保全への貢献が図れる。
北大-地	①アンモニア酸化細菌を取り巻く微生物群集を一からデザイン化する試みは1996年の電力中央研究所によるものがほぼ唯一例で、それ以外は活性汚泥をそのまま固定する方法	①アンモニア酸化細菌と共生する細菌に関する報告例はあるが、本研究課題で見つけた Rheinheimera 属細菌は全く新しい発見で、その作用機構はまだ完全には判っていないが、後者の代謝産物がアンモニア酸化細菌を活性化している可能性が示唆された

43/45

プロジェクト開発技術の海外に対する優位性 (3)

	世界の技術レベル・開発動向	本プロジェクトの優位性
北大-工	部分硝化-anammoxプロセスに関しては、やはりオランダのPaques社により、既の実規模の処理プラントが世界各地で合計16基が建設運転されている。 注目すべきは、2010年以降9基が建設されている点である。今後はプラントの建設が加速されると見込まれる。特に中国における建設が増加すると思われる。	国際展開に関しては、出遅れていると言わざるを得ないが、我々の所有するanammox細菌は、オランダPaques社の所有する細菌種とは系統学的に異なり、その点において彼らの有する特許から逃れられると考えられる。さらに、我々のanammox細菌は、Paques社の保有する菌株と比較して、増殖速度が速くスタートアップに有利であること、anammox活性が高く、高付加の窒素負荷に対応可能であること、などが利点としてあげられる。 本プロジェクトで得られた窒素除去速度はこれまでに報告されている速度よりも高く、実用化により適していると考えられる。
電中研	①液体を主体とする高濃度の有機物廃棄物(廃水)では、UASBなどによる効率的なメタン発酵処理 ②下水汚泥、生ゴミなど固形廃棄物を含む廃棄物のメタン発酵では、水理的滞留時間で中温20~30日、高温10日~15日が一般的な処理レベル ③廃棄物(排水)の微生物処理と電気の関わりとして微生物燃料電池の研究	①微生物群担体と担体への電気による微生物制御技術を組み合わせた独自の技術 ②生ゴミなど固形廃棄物に適用したメタン発酵で世界最高レベルの負荷運転による効率を達成 ③下水汚泥処理において高いレベルの容積当たりの効率を達成

44/45

波及効果

