環境研究総合推進費（2019～2021年度）

環境中に放流された排水由来GHGs排出メカニズムの解明と排出量算定方法の検討

Development of an Estimation Methodology Based on Clarification of the Mechanism of Greenhouse Gas Emission from Treated/Untreated Wastewater Discharged into Water Environment

○山崎宏史、村野昭人、青木宗之（東洋大学）
蛯江美孝、小野寺崇　（国立環境研究所）
増田周平　（秋田高専）
寺田昭彦　（東京農工大）

研究背景

- パリ協定、改正地球温暖化対策推進法

  ・・・温室効果ガス（GHGs）削減目標

GHGs排出量の正確な把握が必要

各国による国別温室効果ガス排出・吸収目録
（温室効果ガスインベントリ）

IPCCガイドラインに従い作成

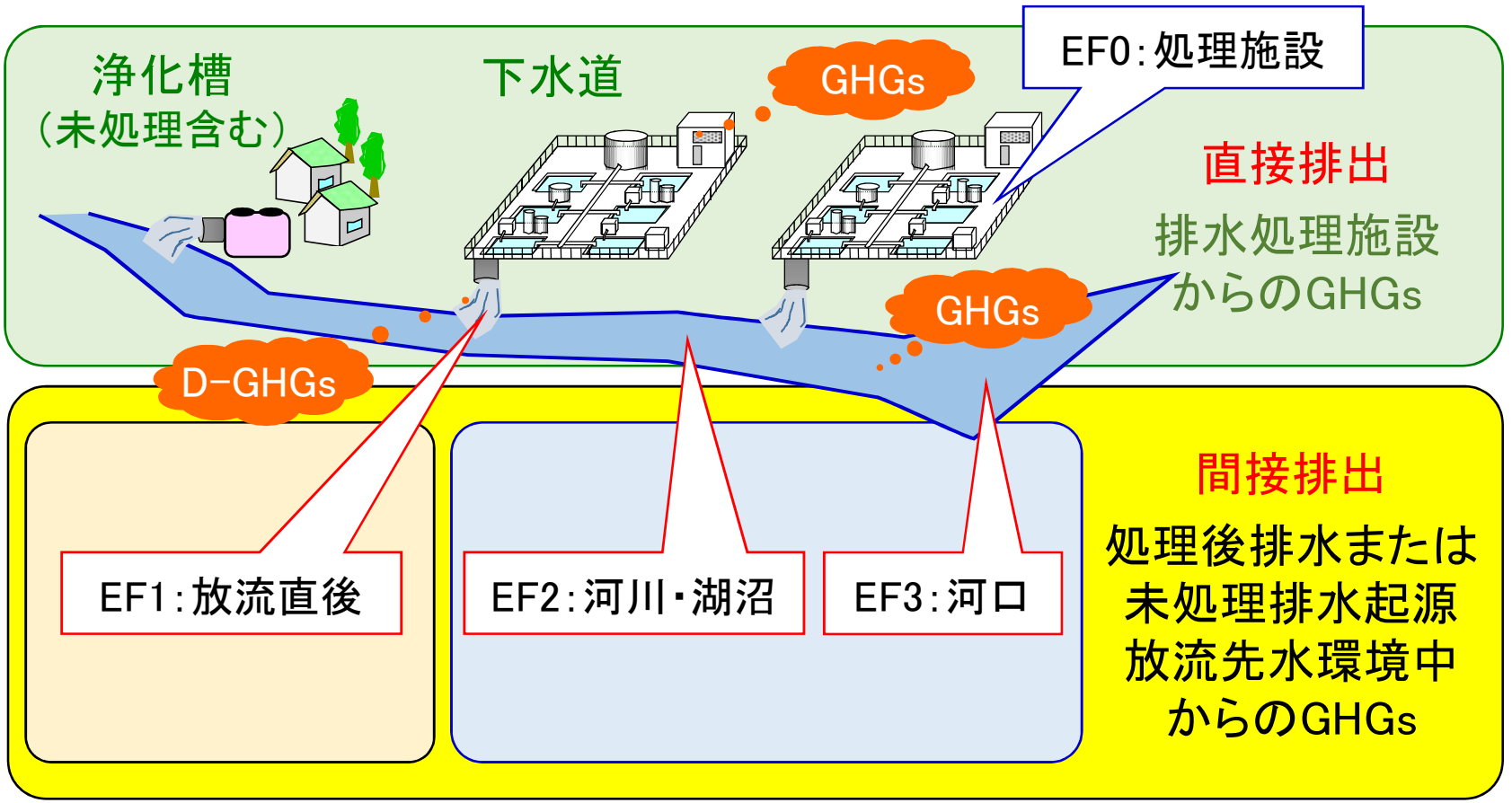
GHGsの排出・吸収目録作成のためのIPCCガイドライン
（2006年　IPCCガイドライン）

世界各国で利用できることを目的としている

デフォルトの排出係数は不確実性が高い

各国が独自の排出係数を調査・利用することを推奨

生活排水処理に伴うGHGsの直接排出と間接排出



生活排水処理（下水道・浄化槽）に伴い排出されるGHGs

- 直接排出（排水処理施設からのGHGs）
- 間接排出（放流先水環境からのGHGs）

区分される

日本国における生活排水処理分野の排出係数開発状況

区分	算定対象			処理方式		CH_4	N_2O
5.D.1	生活排水	処理施設	公共下水道	終末処理場	標準活性汚泥法 他3種	○	○
			公共下水道以外	生活排水処理施設（主に浄化槽）	合併処理浄化槽	○	○
					単独処理浄化槽	○	○
					汲み取り便槽 他1種	○	○
				し尿処理施設	高負荷脱窒素 他5種	○	○
		公共用水域	未処理排水	生活排水の自然界における分解	生活雑排水の未処理排出	○	○
			処理後排水		処理後排水	N/A	○
			汚泥		海洋投入処分	○	○

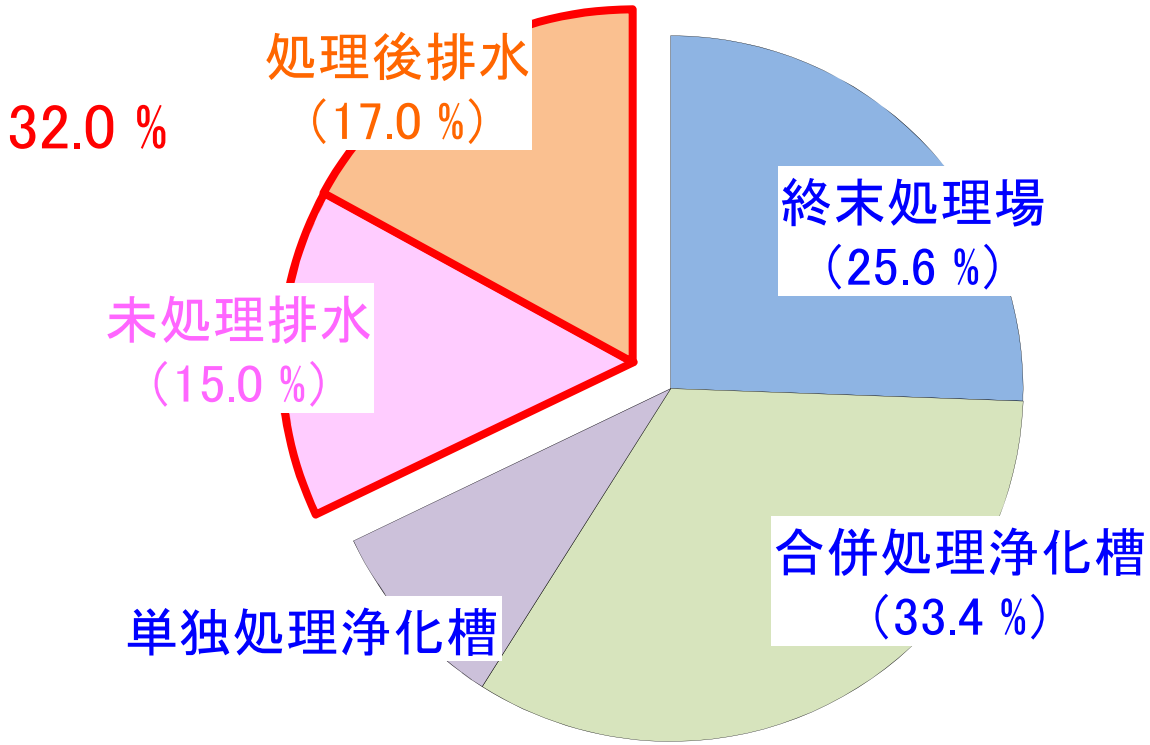
国内調査研究

発表者らの調査研究※

生活排水の自然界における分解 に伴い排出されるGHGs
過去に国内研究事例が少なく IPCCガイドラインのデフォルト値を使用

※ Y. EBIE, H. YAMAZAKI et.al., “Development of Emissions Factor for the Decentralized Domestic Wastewater Treatment for the National Greenhouse Gas Inventory”, Journal of Water and Environment Technology, 12, 1, pp.33-41, 2013

生活排水処理分野におけるGHGs排出量の現状（5.D.1）



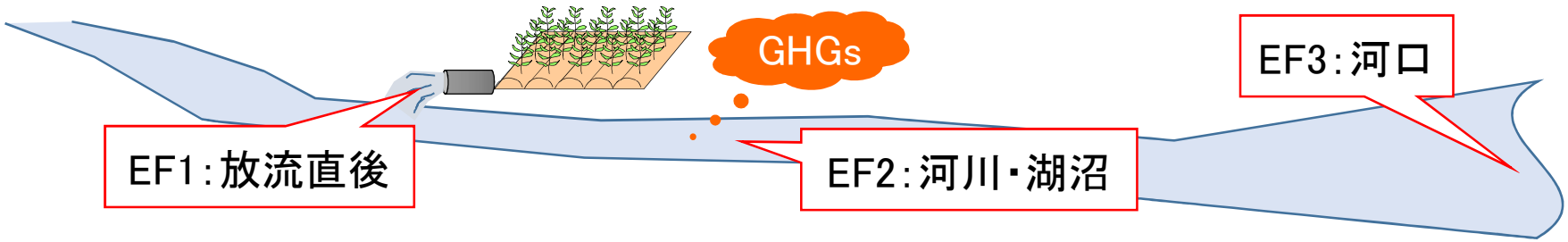
生活排水処理分野　算定対象別 GHGs(CO_2eq) 排出量割合（2018年）

生活排水処理分野 処理後排水・未処理排水
自然界における分解に伴うGHGs排出は全体の 32 % を占める

自然界でのGHGs排出量の精緻化は 非常に大きな影響がある

IPCCガイドライン・デフォルト値を適用することに対する課題1

排水分野にも EF1（放流直後）を含める 検討が必要

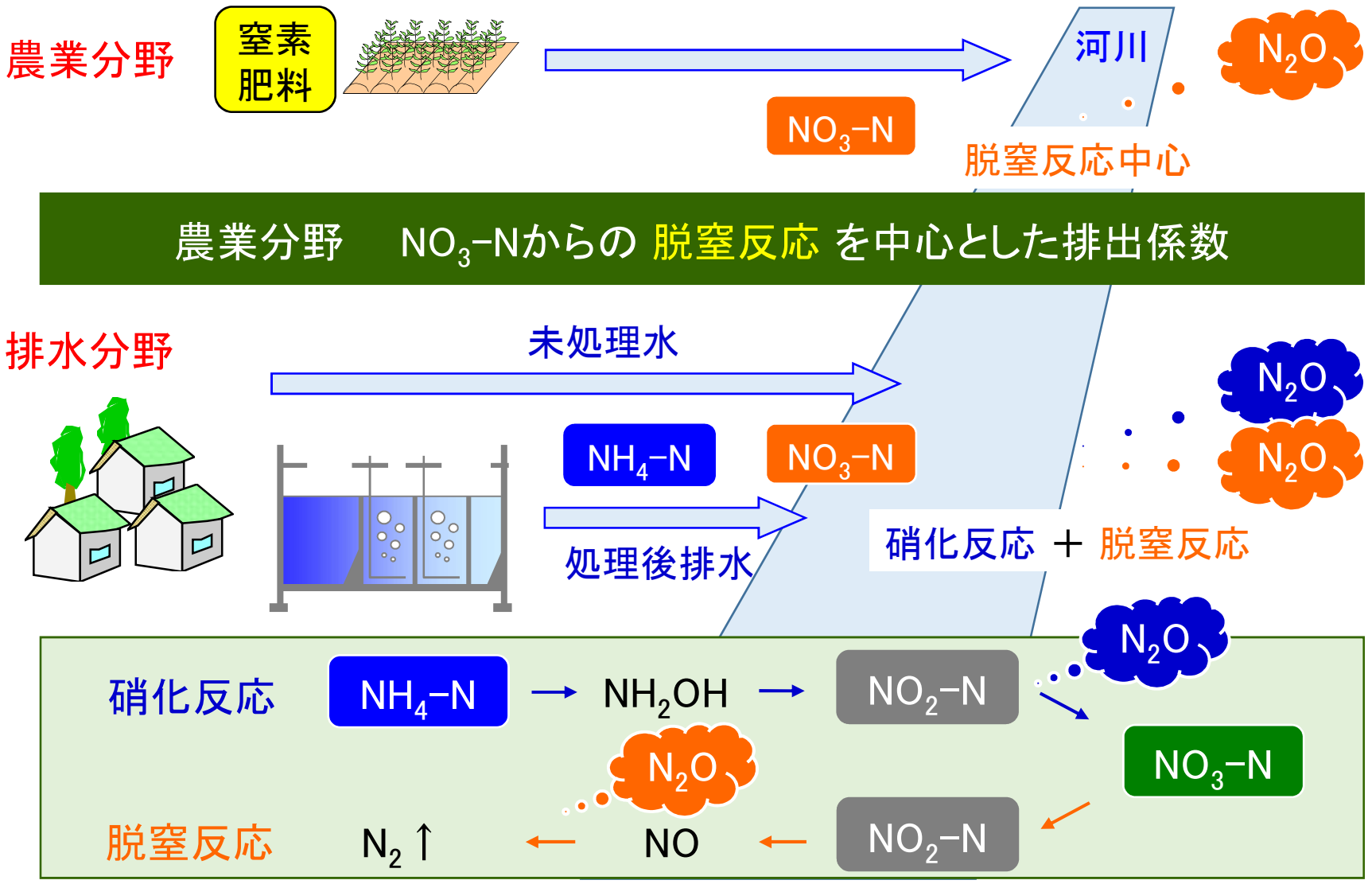


	EF1（放流直後）	EF2（河川・湖沼）	EF3（河口）	現EF
農業分野	放流直後のEF 2.5 g-N_2O-N/kg-N 	河川・湖沼中のEF 2.5 g-N_2O-N/kg-N	河口でのEF 2.5 g-N_2O-N/kg-N	EF1 + EF2 + EF3
	放流直後の処理水　状況が類似		転用	
排水分野	~~放流直後のEF~~ ~~2.5~~ ~~g-N_2O-N/kg-N~~ 	河川・湖沼中のEF 2.5 g-N_2O-N/kg-N	河口でのEF 2.5 g-N_2O-N/kg-N	~~EF1~~ + EF2 + EF3

処理後排水の排出係数EF ： 農業分野のEF2（河川・湖沼）＋EF3（河口）のみを転用

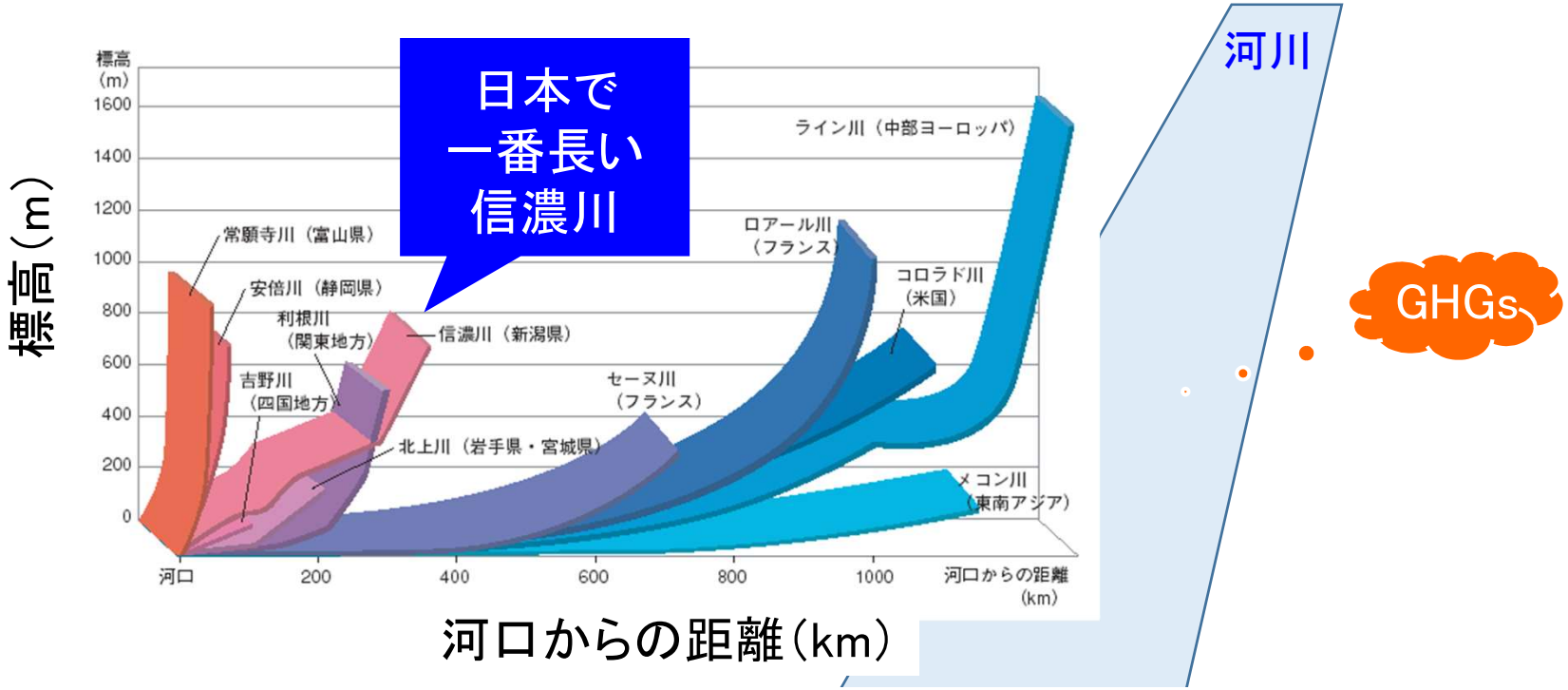
IPCCガイドライン・デフォルト値を適用することに対する課題2

排水分野では窒素形態により 硝化反応 の考慮が必要



IPCCガイドライン・デフォルト値を適用することに対する課題3

日本における 河川環境 の考慮が必要



デフォルト値　日本の河川の特徴や気候帯を反映していない

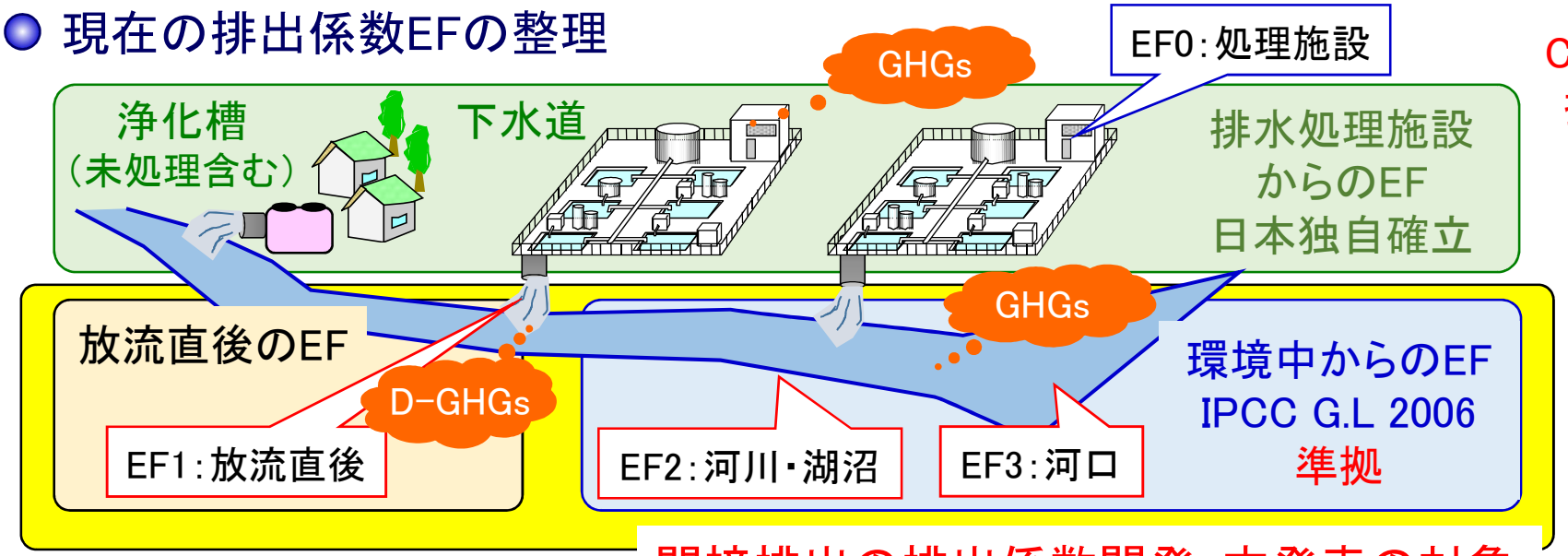
日本の河川は世界の代表的な河川と比べて急峻で清澄

放流先の溶存酸素濃度や撹拌状態、底質の状態が異なる

※国土交通省：日本と世界の河川の比較
https://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/kasen/gaiyou/panf/gaiyou2005/pdf/c1.pdf

目的1　GHGs排出係数(EF)の開発

現在の排出係数EFの整理



CH_4・N_2O
排出量

約 2/3

約 1/3

間接排出の排出係数開発：本発表の対象

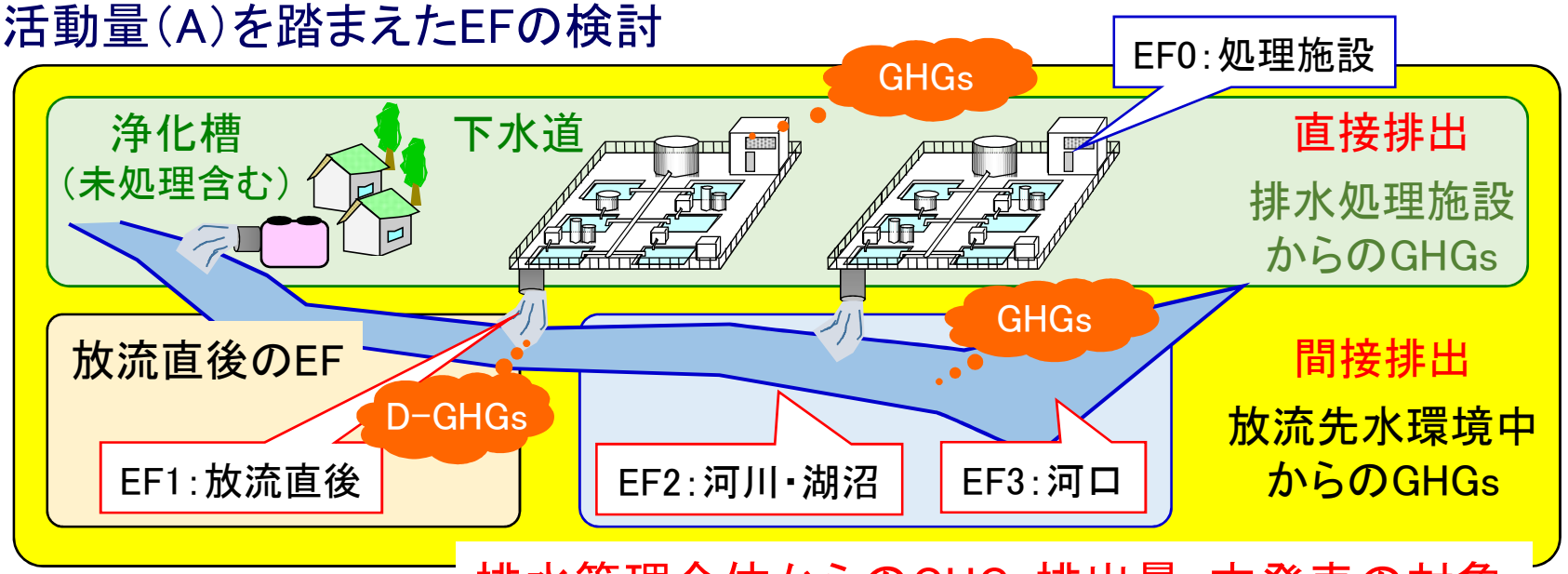
研究課題の整理1（目的1）

対象	放流直後（EF1）	放流河川（EF2+3）	
状況（課題）	処理後排水 D-N_2O残存	河川環境 （急峻，清澄）	排水に含まれるNH_4-N 硝化反応由来N_2O
IPCC G.L. 2006 （現NIR適用）	考慮されていない	5 g-N_2O-N/kg-N	（硝化＋）脱窒反応 考慮 硝化反応 考慮不十分
IPCC G.L. 2019		5 g-N_2O-N/kg-N（清　澄） 19 g-N_2O-N/kg-N（富栄養）	
研究課題	EF1（放流直後） 含める考慮が必要	日本の河川環境 考慮が必要	硝化反応 考慮が必要

目的2　GHGs排出量の算定とGHGs排出最小化モデルの検討

GHGs排出量(E)＝排出係数(EF)×活動量(A)

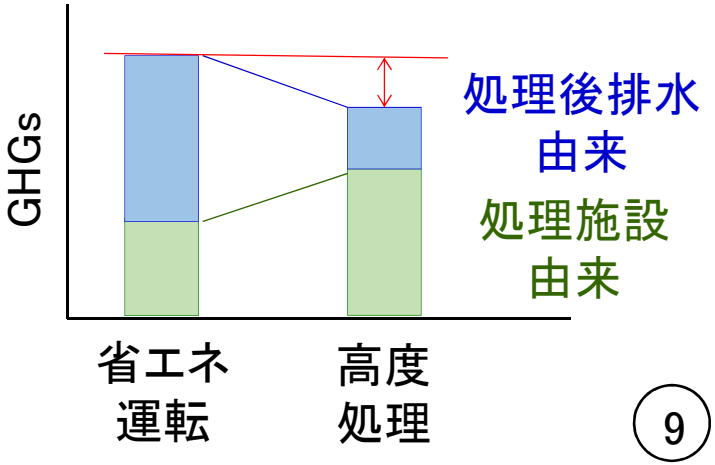
- 活動量(A)を踏まえたEFの検討



排水管理全体からのGHGs排出量：本発表の対象

- 研究課題の整理2(目的2)

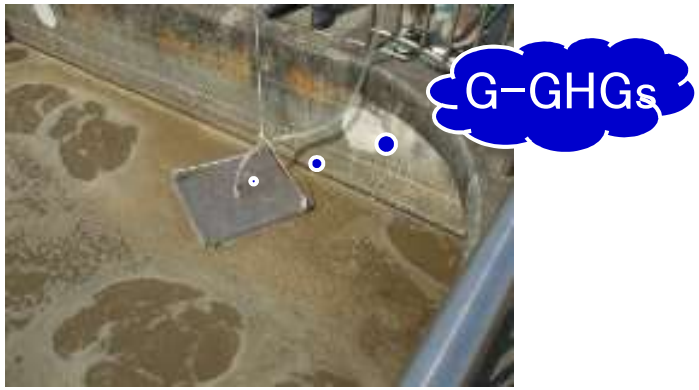
研究課題
活動量(A)を踏まえたEFの検討
処理施設や放流先の状況に応じて複数のEFを使い分ける方法論の検討
処理施設由来＋処理後排水由来のトレードオフを含めたGHGs排出量の最小化を検討



成果の概要1

処理後排水に残存する溶存態GHGs排出係数(EF1)の提案

- 下水道・浄化槽処理後排水および未処理生活雑排水に残存する溶存態GHGsを推定する排出係数(EF1)の提案

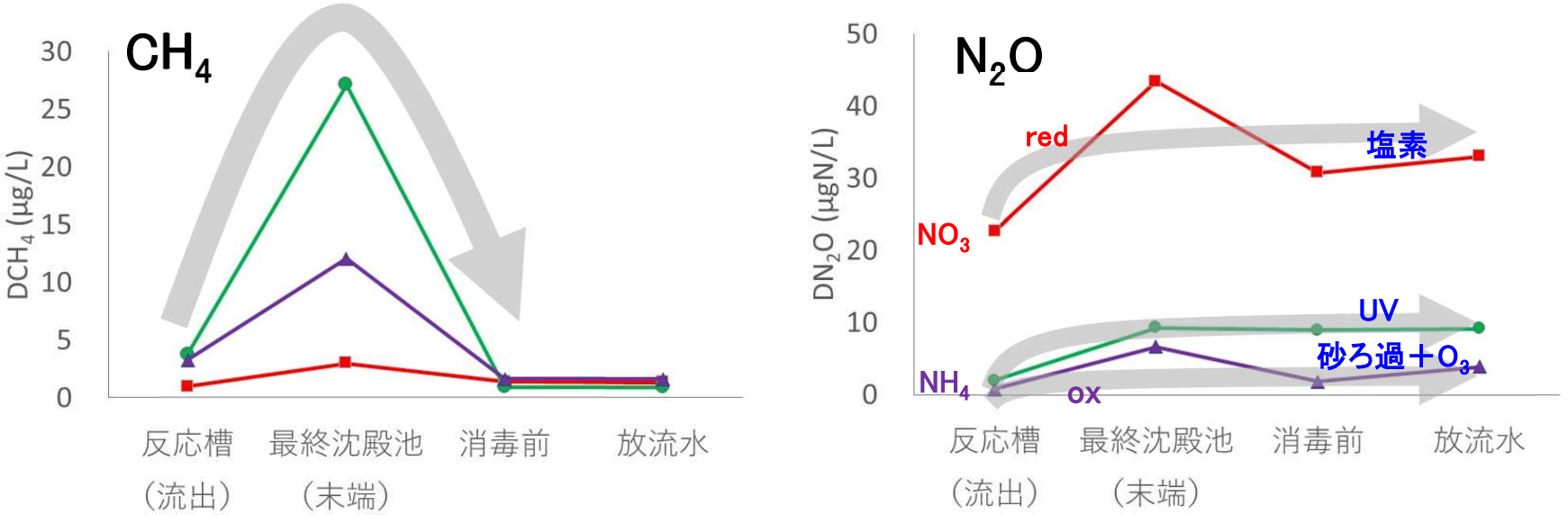


EF0:処理施設

EF1:処理後排水

下水道終末処理場　反応槽以降のD-GHGs変動

- 複数の異なるプロセスの下水処理場　溶存態(D-)GHGsの変動



■B処理場(疑似AO・硝化あり)　▲E処理場(疑似AO・硝化なし)　●D処理場(AOAO:高度N除去)

- 既往の知見も含めて放流水のD-GHGs濃度を整理

CH_4 中央値:1.4 μg/L
(大気平衡濃度≒0.03 μg/L)
CH_4:40 μgCO_2/L

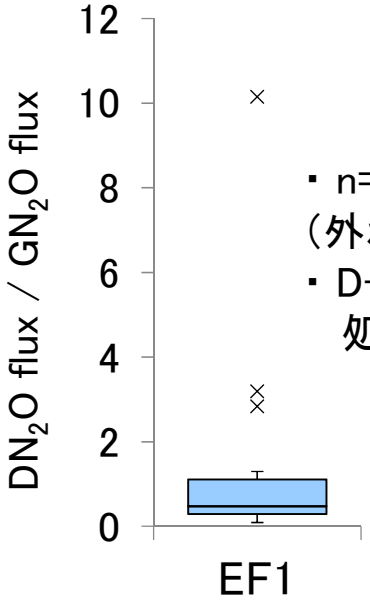
<<
83倍

N_2O 中央値:12.6 μg/L
(大気平衡濃度≒0.26 μg/L)
N_2O:3,327 μgCO_2/L

処理後排水に残存する相対的な寄与　CH_4小　<<　D-N_2O大

下水道処理後排水に残存するD-GHGs排出係数の開発

下水道処理後排水に残存するD-GHGs排出係数開発



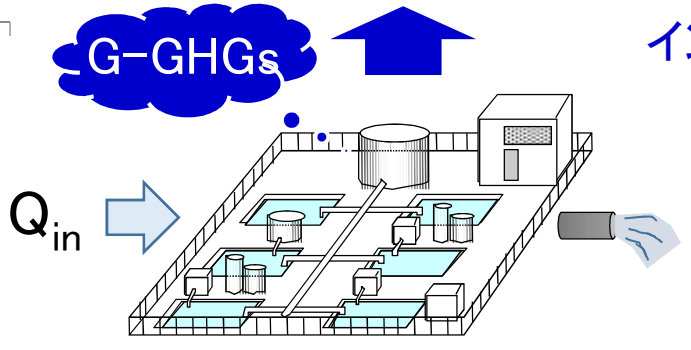
・n=15
（外れ値3ケース）
・D-N_2Oは
処理水および反応槽

下水道処理後排水残存D-N_2O排出係数：EF1：
下水道処理施設由来G-N_2O排出係数（EF0）
に対し一律の比率として定義

中央値=0.48（EF1）

処理施設由来G-N_2O = EF0 × Q_{in}

インベントリにて設定済

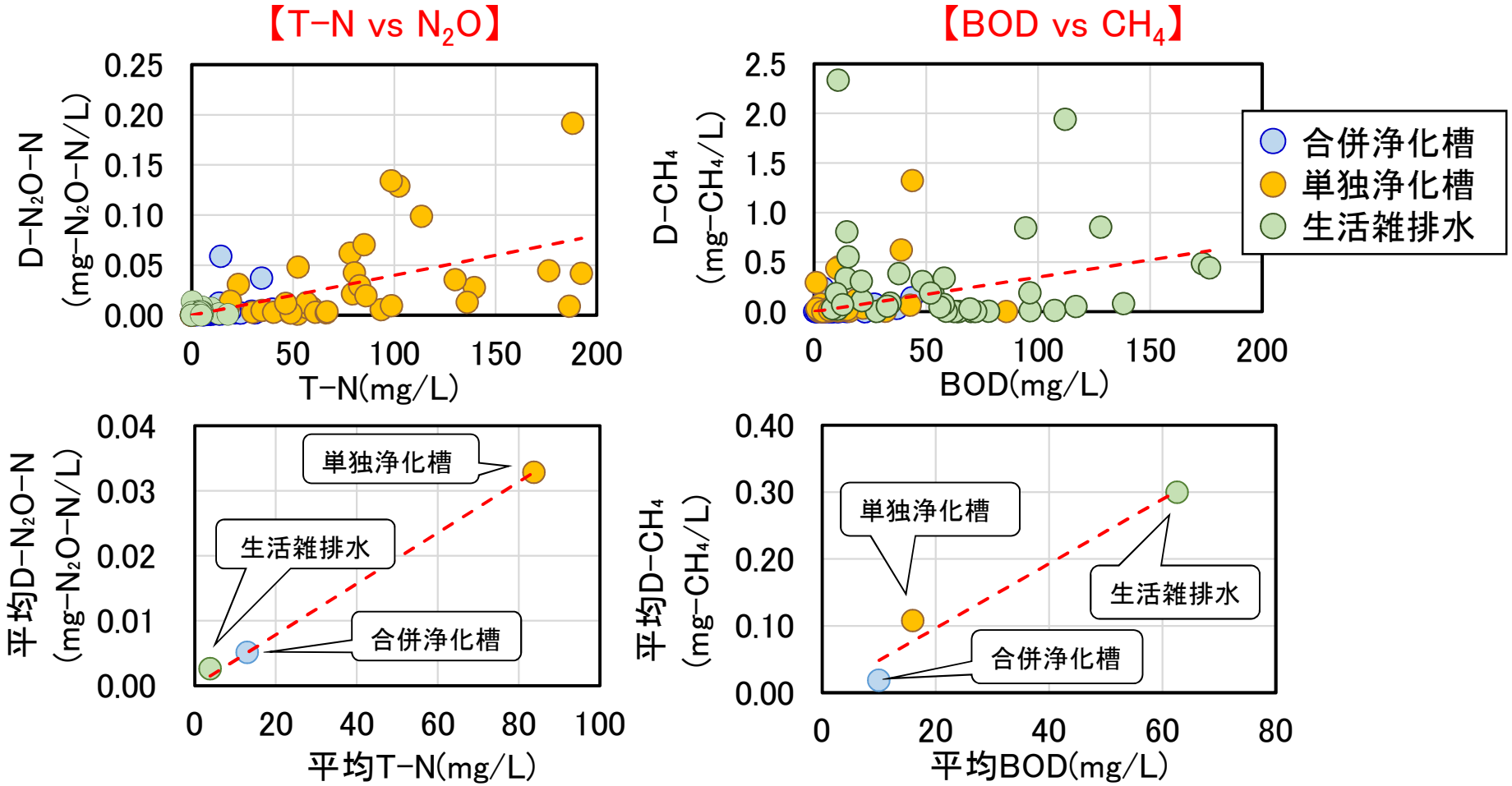


処理後排水由来D-N_2O =
EF_1 × 処理施設由来G-N_2O

下水道処理後排水からのN_2O排出量 ： 0.48 × 処理施設由来G-N_2O

- EF_0の改訂に対して自動的に反映可能
- 処理プロセス由来G-GHGs削減 → 処理後排水由来D-GHGs削減

浄化槽処理後排水に残存するD-GHGs排出係数の開発



浄化槽処理後排水残存D-GHGs排出係数：EF1 ：処理水質の比率として定義

浄化槽処理後排水からのN_2O排出量 ： $D\text{-}N_2O = T\text{-}N \times 0.0004$

浄化槽処理後排水からのCH_4排出量 ： $D\text{-}CH_4 = BOD \times 0.004$

・単独浄化槽から合併浄化槽への転換 → 自動的に反映可能

成果の概要2

環境中に放流される処理後排水を起源とする GHGs排出量算定方法（EF2）の提案

- 処理後排水由来自然界での分解に伴う排出係数（EF2）および排出量算定方法の提案

EF2：環境中からのGHGs排出

下水道/河川　調査対象

調査対象

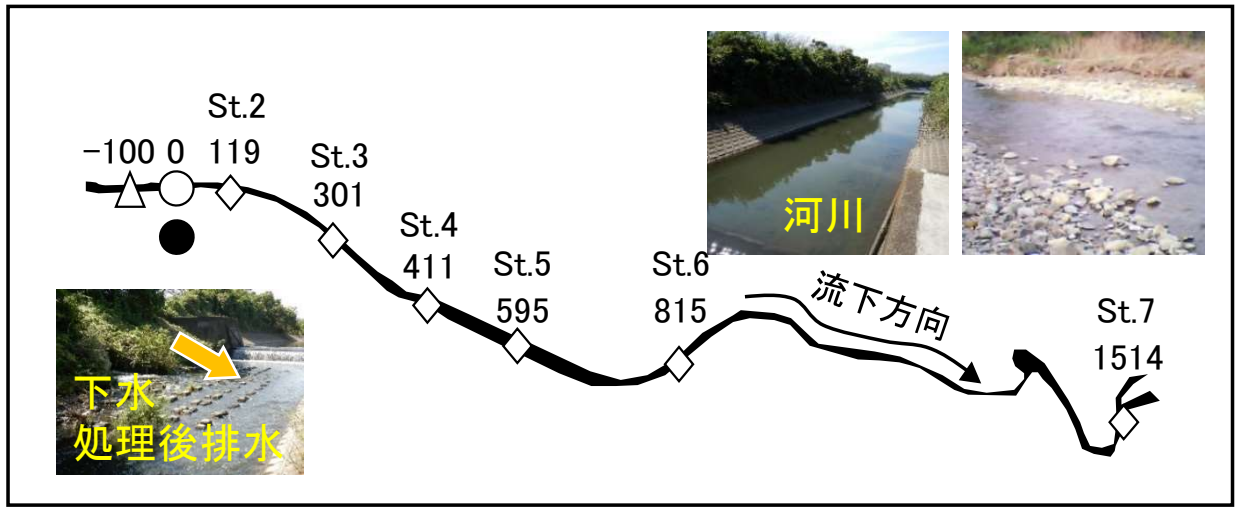
河川環境基準点 ・・・ 20地点

・河川環境基準類型 AA～C　　2020年、2021年 夏季・冬季

下水道終末処理場＋放流河川 ・・・ 3処理場

・下水処理場A（オキシデーションディッチ法） / 河川α（環境基準B）　2019/7～2021/9 毎月1～2回程度
・下水処理場B（標準活性汚泥法） / 河川β（環境基準A）　2021/5～2022/3 毎月1～2回程度
・下水処理場C（標準活性汚泥法） / 河川γ（環境基準C）　2021/5～2022/3 毎月1～2回程度

下水処理場Aと放流河川α（一級河川）



下水道/河川　調査対象の特徴

下水処理後排水および河川の流量と特徴

	放流水量 ($m^3\ h^{-1}$)	河川水量 ($m^3\ h^{-1}$)	処理方式	環境基準類型指定
処理場A	706	—	OD法	
処理場B	1,144	—	標準活性汚泥法	
処理場C	1,020	—	標準活性汚泥法	
河川 α	—	1,465	—	B
河川 β	—	1,420	—	A
河川 γ	—	589	—	C

各調査地点の特徴

Aグループ（処理場A＋河川 α）
　処理水：清　　河川：汚

Bグループ（処理場B＋河川 β）
　処理水：汚　　河川：清

Cグループ（処理場C＋河川 γ）
　処理水：汚　　河川：汚

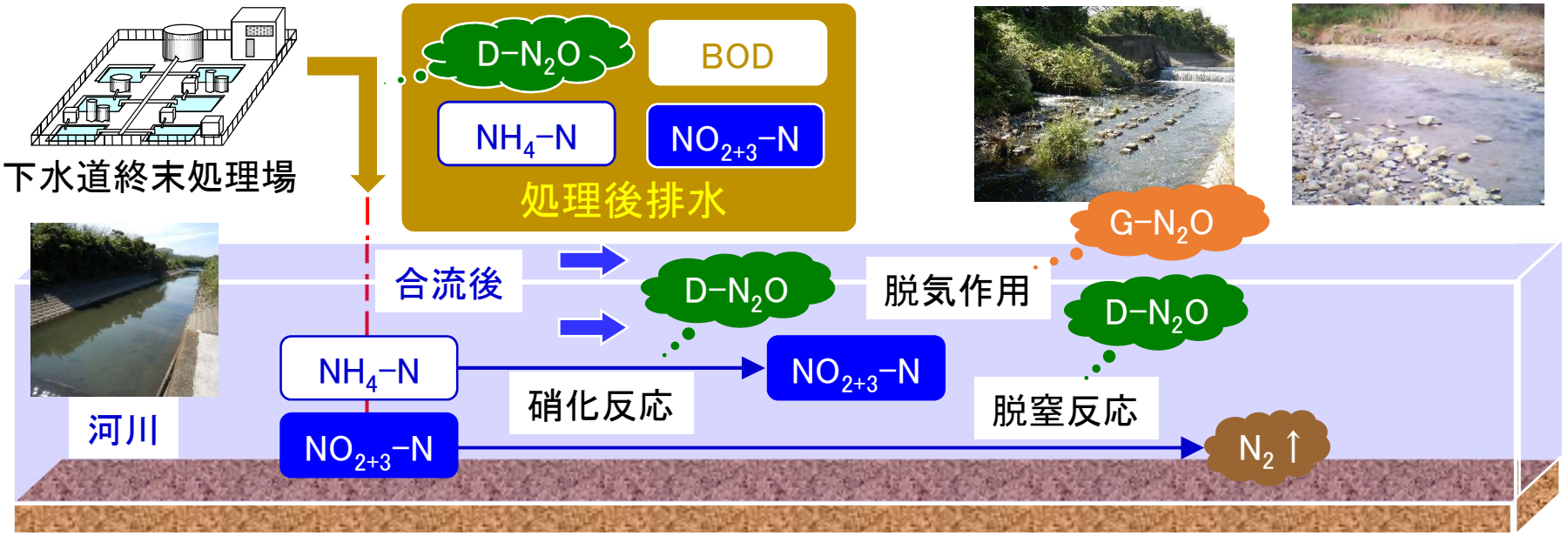
下水処理後排水および河川の水質

	BOD ($mg\ L^{-1}$)	SS ($mg\ L^{-1}$)	T-N ($mg\ L^{-1}$)	NH_4-N ($mg\ L^{-1}$)	NO_2-N ($mg\ L^{-1}$)	NO_3-N ($mg\ L^{-1}$)
下水道終末処理場A	1.7	2.1	2.1	0.70	0.012	0.57
下水道終末処理場B	2.9	1.3	14	9.5	0.26	2.7
下水道終末処理場C	1.9	6.9	12	4.8	0.99	3.9
河川 α	1.9	4.3	2.7	0.49	0.022	1.4
河川 β	1.2	1.7	1.5	0.21	0.012	1.2
河川 γ	3.0	25	3.8	1.2	0.065	1.9

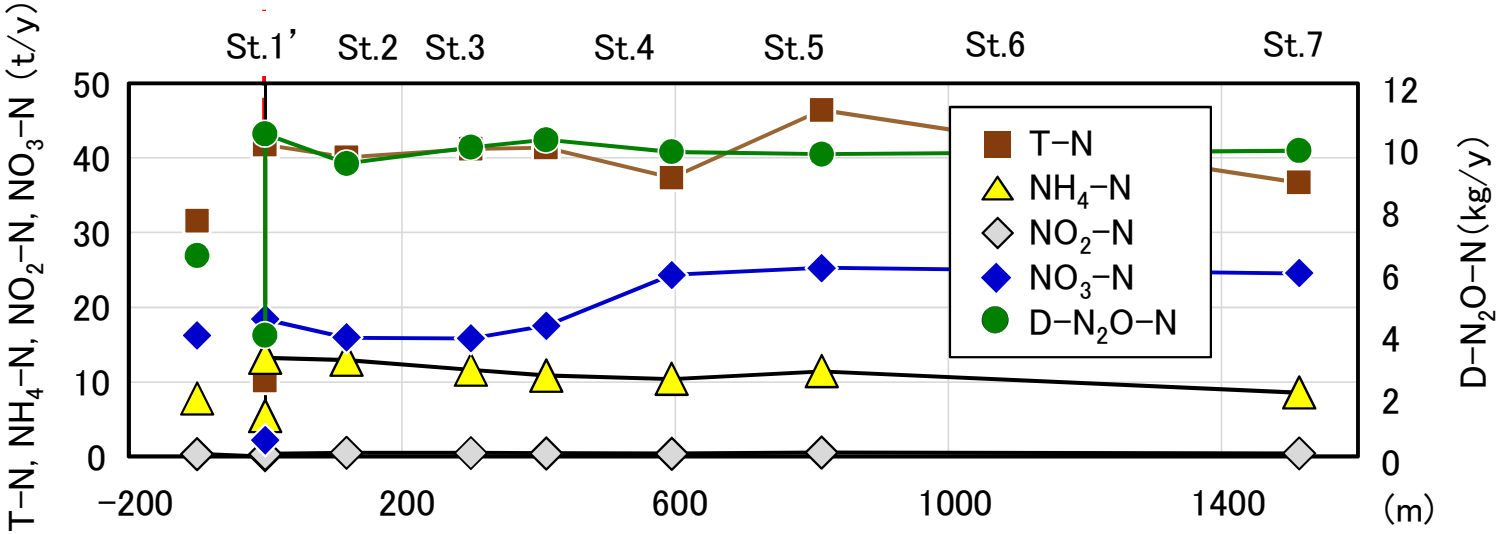
EF2（河川） 河川流下方向における窒素挙動モデル

下水道終末処理場

河川



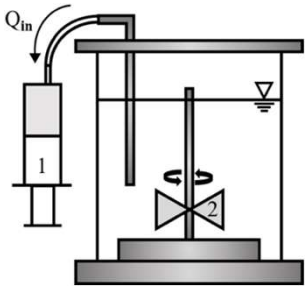
下水
処理場A
＋
河川α

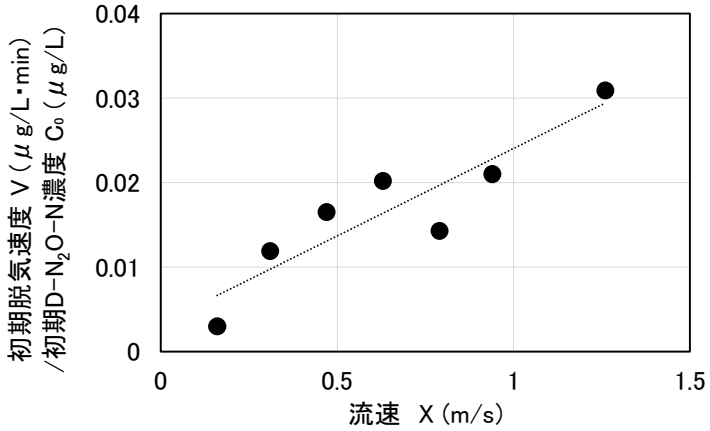


処理後排水 → 河川　脱気作用＋硝化反応＋脱窒反応　複合的影響存在

EF2（河川） 脱気D-N_2O量の算定

- 室内モデル試験　初期D-N_2O-N濃度・流速を変化　N_2O脱気速度を算出



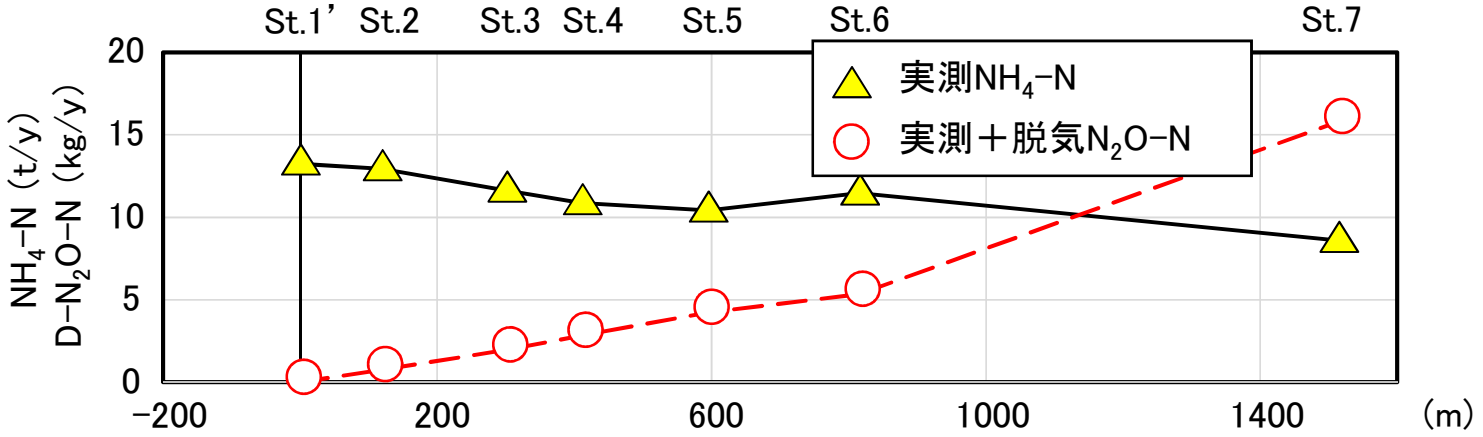


$V=(0.0207X+0.0034)C_0$　・・・式(1)

V　：初期脱気速度（μg/L・min ）
Co：初期D-N_2O-N濃度（μg/L）
X　：流速（m/s）

- 処理後排水・合流前河川水に残存するD-N_2O量の考慮

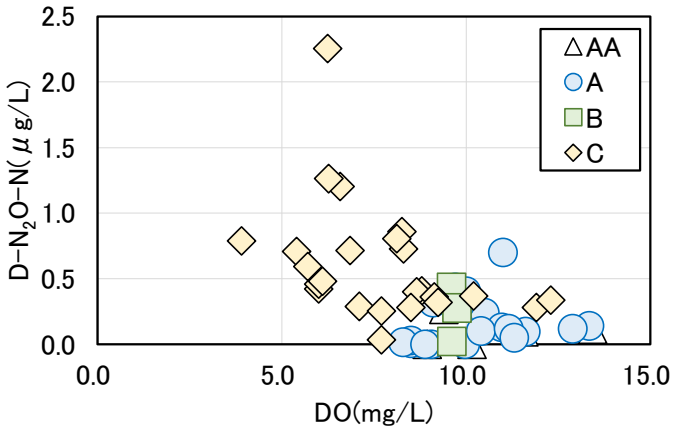
下水
処理場A
＋
河川α



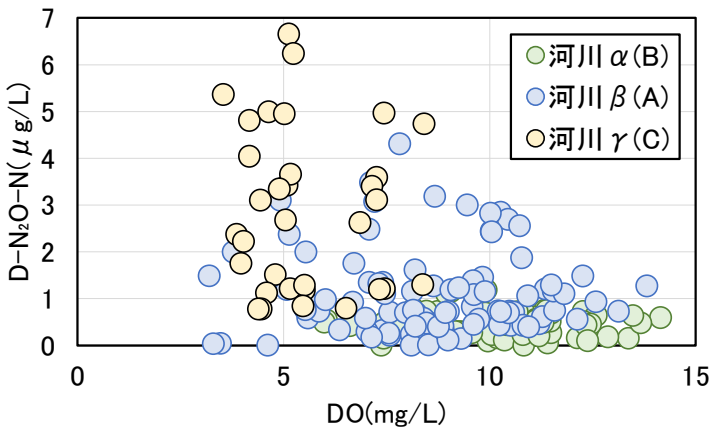
処理後排水に含まれる窒素成分を起源に河川で生成されるD-N_2O量
処理後排水＋河川水に残存するD-N_2O量を差し引く必要がある

EF2（河川） 河川環境がGHGs生成に及ぼす影響

- 環境基準類型指定別DOとD-N_2O



- 河川α～γにおけるDOとD-N_2O



環境基準類型 C ： DO濃度約 8mg/L 以下 D-N_2O生成量増加

- 河川環境を考慮した硝化由来D-N_2O排出係数の開発

河川名	環境基準	N_2O排出係数 ($g-N_2O-N/kg-NH_4-N$)
河川β	A	1.6
河川α	B	3.4
河川γ	C	4.0

$$N_2O\text{排出係数}\ (g\text{-}N_2O\text{-}N/kg\text{-}NH_4\text{-}N) = \frac{\text{河川の硝化反応で生成した } N_2O\text{-}N\text{量}\ (g\text{-}N_2O\text{-}N/\text{年})}{\text{河川で減少した } NH_4\text{-}N\text{量}\ (kg\text{-}NH_4\text{-}N/\text{年})} \quad \cdots \text{式(2)}$$

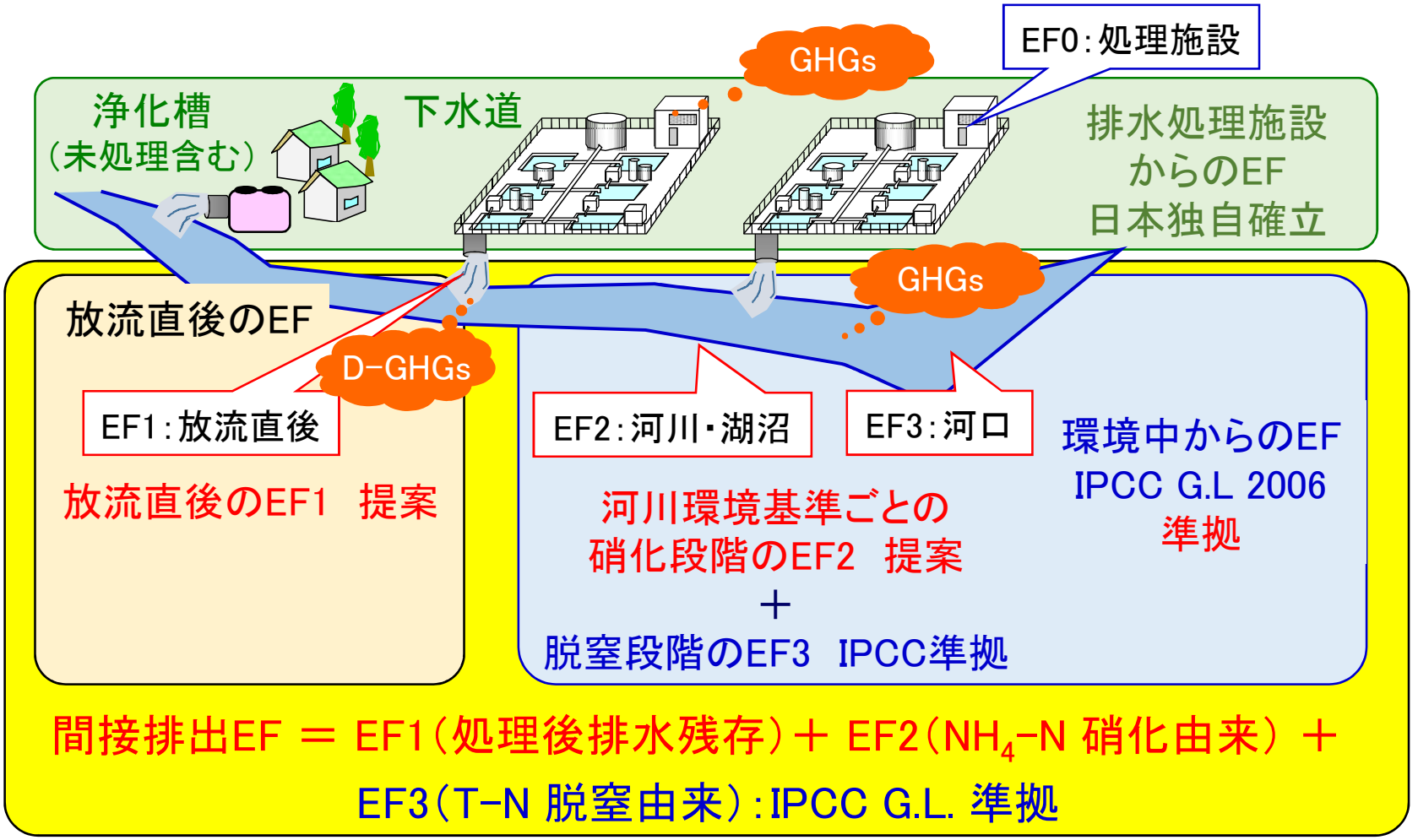
環境基準類型　B以上　2.5($g-N_2O-N/kg-NH_4-N$)

環境基準類型　C以下　4.0($g-N_2O-N/kg-NH_4-N$)

河川環境を考慮した処理後排水NH_4-Nを起源としたN_2O排出係数を提案

下水道処理後排水を起源としたN$_2$O排出係数(EF1～3)の提案

● 間接排出における排出係数EFの提案



下水道処理後排水を起源としたN_2O算定方法の開発

	排水処理方式	処理施設 N_2O排出		処理後排水 残存N_2O	
		EF0	活動量	EF1	活動量
IPCC G.L. Default（2006）				考慮されていない	
IPCC G.L. Default（2019）				考慮されていない	
	標準活性汚泥法	0.090 g-N_2O-N/m^3	排水処理量（m^3）	EF0 × 0.48	排水処理量（m^3）
	嫌気好気活性汚泥法	0.019 g-N_2O-N/m^3			
	嫌気無酸素好気法・循環式硝化脱窒法	0.007 g-N_2O-N/m^3			
	循環式硝化脱窒型膜分離活性汚泥法	0.0003 g-N_2O-N/m^3			

河川環境	処理後排水 由来N_2O	
	EF2+3	活動量
考慮されていない	硝化由来考慮不十分 5 g-N_2O-N/kg-N（脱窒由来）	排水処理量 × 放流T-N濃度
清澄な河川	5 g-N_2O-N/kg-N	排水処理量 × 放流T-N濃度
富栄養化河川	19 g-N_2O-N/kg-N	
河川環境基準（AA～B）	2.5 g-N_2O-N/kg-NH_4-N（硝化由来）	排水処理量 × 放流NH_4-N濃度
	5 g-N_2O-N/kg-N（脱窒由来）IPCC(2006)準拠	排水処理量 × 放流T-N濃度
河川環境基準（C～E）	4.0 g-N_2O-N/kg-NH_4-N（硝化由来）	排水処理量 × 放流NH_4-N濃度
	5 g-N_2O-N/kg-N（脱窒由来）IPCC(2006)準拠	排水処理量 × 放流T-N濃度

下水道処理後排水を起源とした河川からのN_2O排出量算定式＝

IPCC G.L. Default（2006）＋処理後排水残存N_2O＋処理後排水硝化由来N_2O

排水管理全体のGHGs排出モデルの構築・最小化のシナリオの提案

- 直接排出（処理施設由来）と間接排出（処理後排水由来）を併せた排水管理全体のGHGs排出モデルの構築

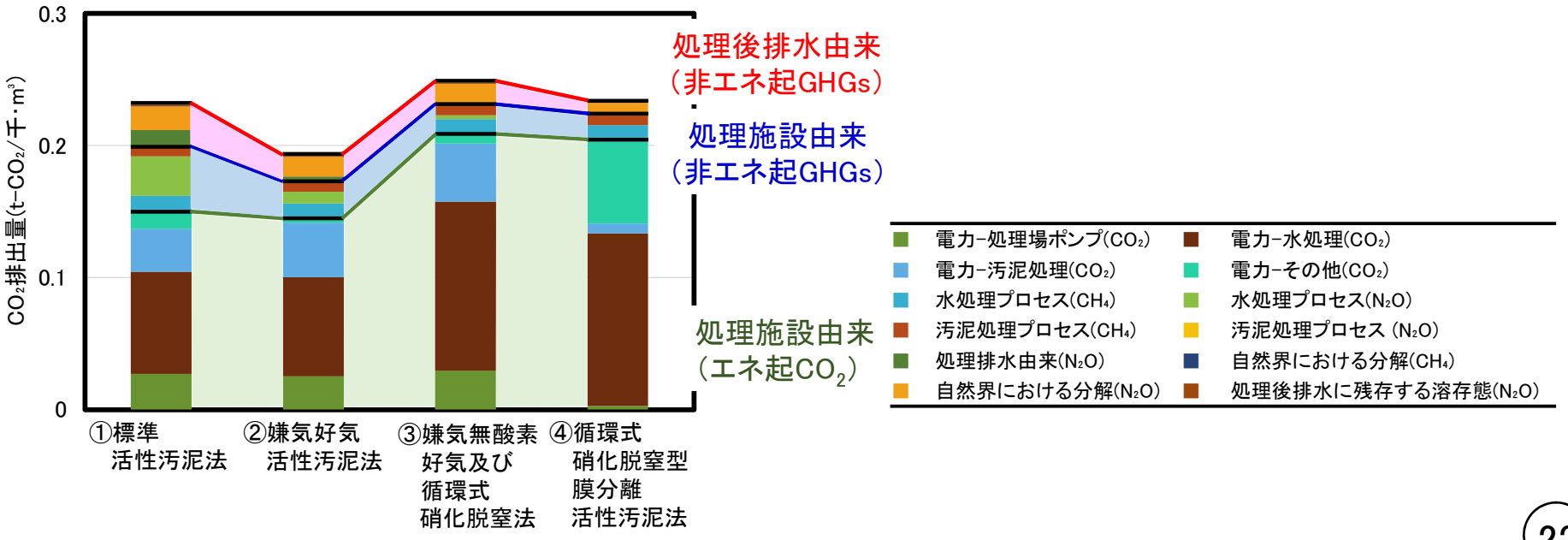
下水道の高度処理化

- エネルギー起源CO_2増大
- 排水処理施設由来GHGs減少
- 処理後排水由来GHGs減少

→ 非エネルギー起源GHGsの削減重要

⇒ GHGs排出量増大

→ 省エネ・創エネが進行（代替エネルギー）



排水管理全体のGHGs排出モデルの構築・最小化のシナリオの提案

- 直接排出（処理施設由来）と間接排出（処理後排水由来）を併せた排水管理全体のGHGs排出最小化シナリオ

直接排出（処理施設由来）＋間接排出（処理後排水由来）GHG排出量

GHGs排出量 ＝ 排出係数 × 活動量

	排出係数	活動量	削減効果
高度処理化	・排水処理施設由来G-N_2O減少 → 処理後排水残存N_2O減少 ・河川清澄化により環境基準B以上 → 排出係数の小さいカテゴリーへ移動	処理後排水 残存 NH_4-N量・ T-N量減少	処理施設由来＋ 処理後排水由来 GHGs排出量 50%以上削減

直接排出と間接排出を併せた排水管理全体のGHGs排出モデルを構築

高度処理化により直接・間接排出の効果によるGHGs排出量削減方策を提案

まとめ

- 下水道・浄化槽処理後排水および未処理生活雑排水に
  残存する溶存態GHGsの量を推定する排出係数（EF1）の提案
- 処理後排水由来自然界での分解に伴う排出係数（EF2）
  および排出量算定方法の提案
- 直接排出と間接排出を併せた排水管理全体からの
  総合的なGHGs排出量最小化シナリオの提案

謝辞　本研究は環境省環境研究総合推進費（JPMEERF20192002）により実施された
ここに記して謝意を表す.