

福島原発事故収束に向けたバックエンド領域の取り組み (実践編)

環境修復の取り組み (電中研 長岡亨)

略歴 (電中研・長岡)

1995 年、北海道大学大学院修了後、(財) 電力中央研究所入所。栃木県出身。入所後、微生物による石炭脱硫・脱灰研究に従事 (2000 年、学位取得)。カナダ国立研究院に留学後、放射性廃棄物処分における微生物影響研究に従事。現在、電力中央研究所 環境科学研究所 バイオテクノロジー領域 主任研究員 (専門分野：生物地球化学)。

日本原子力学会バックエンド部会運営小委員会委員、同出版小委員会委員長、同学会クリーンアップ分科会委員。



福島原発事故収束に向けたバックエンド領域の取り組み(実践編)

環境修復に関する取り組み

(財)電力中央研究所
環境科学研究所
バイオテクノロジー領域
長岡 亨



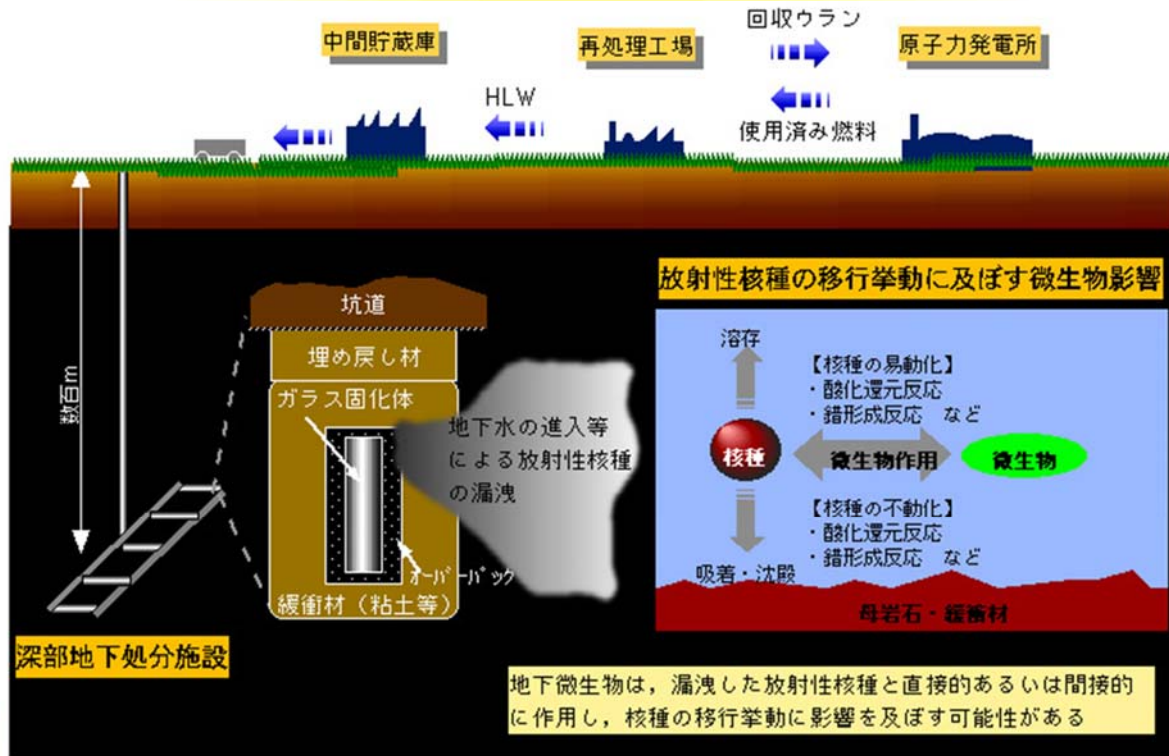
主な内容

□ 放射性核種の環境動態

(バックエンド領域の貢献:核種移行に及ぼす微生物影響など)

□ 東京電力との環境モニタリングに関する取り組み

(警戒区域及び計画的避難区域における詳細モニタリング)



地下深部にもたくさんの微生物が生息している！

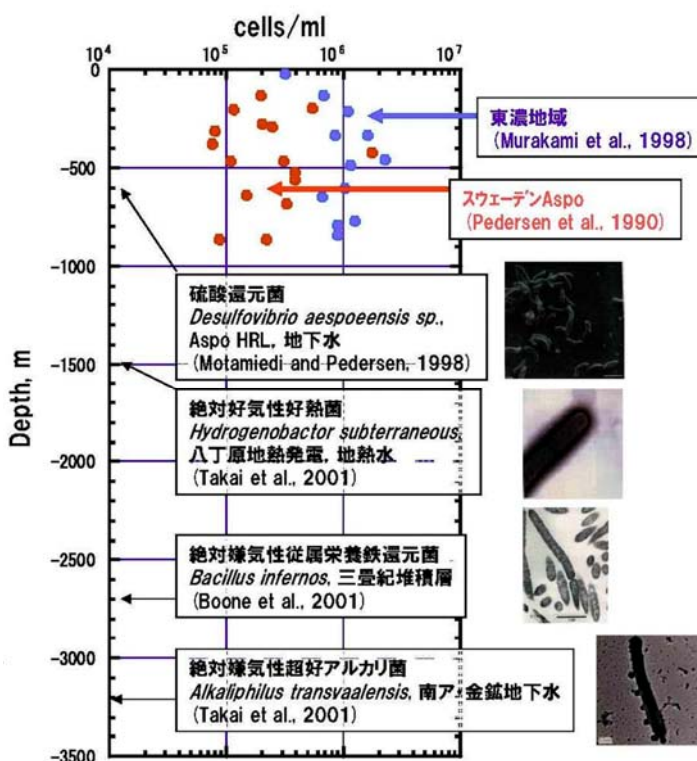
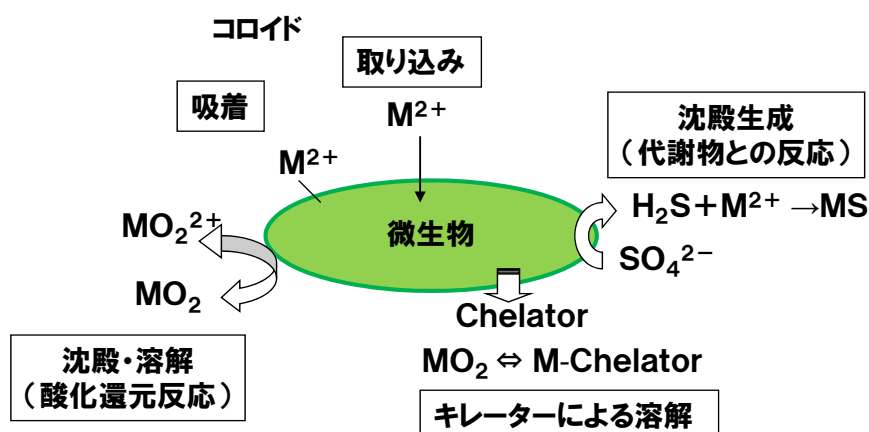


表 地下水中の菌体数

深度, m	菌体数, cells/ml	場所
350-400	10^3-10^5	Canada (Granite)
200-950	10^5-10^6	Finland (Granite)
799-1240	$2 \times 10^1-1.3 \times 10^5$	Stripa, Sweden (Granite)
129-1078	$1.5 \times 10^4-1.8 \times 10^6$	Aspo Sweden (granite)
ca. 350	$9.5 \times 10^1-9.0 \times 10^4$	Grimsel, Switzerland (Granite)
10-281	9.4×10^5	Altnabreac, UK (Granite)
190-223	1.2×10^3	Mol, Belgium (Boom clay)
165-331	$8.6 \times 10^3-3.5 \times 10^5$	Harwell, UK (Oxford clay)
750	ND	Asse, Germany (Salt)
60	10^2-10^3	Yucca Mountain, USA (Volcanic tuff)

(West et al., 2002)



放射性核種の地下水移行に及ぼす微生物影響

5

当所の研究紹介

- 微生物は核種移行を抑制する
(硫酸還元菌によるNpの不溶化)
- 微生物は核種移行を促進する
(微生物が生成するキレーターによるPuの可溶化)
- 微生物は処分環境形成を担う
(酸化還元状態形成に及ぼす微生物影響)

地下微生物による核種の化学形態変化 ～硫酸還元菌との相互作用によるNp(V)の化学形態変化～

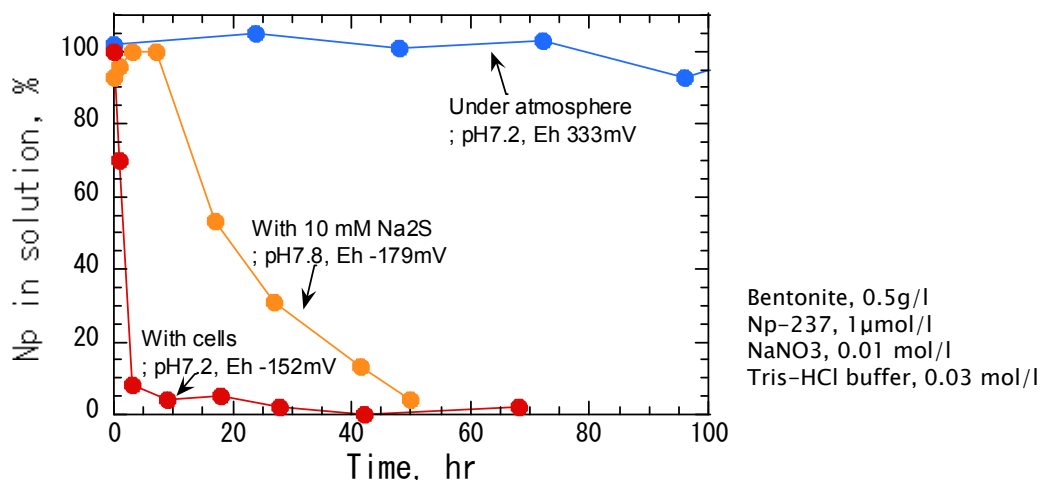


FIG. Microbial impact on Np(V) sorption (Nagaoka, 2004)

処分環境に生息する微生物が核種の化学形態を変化させ、核種の移行挙動に影響を及ぼす可能性が示唆される

7

シデロフォアの影響

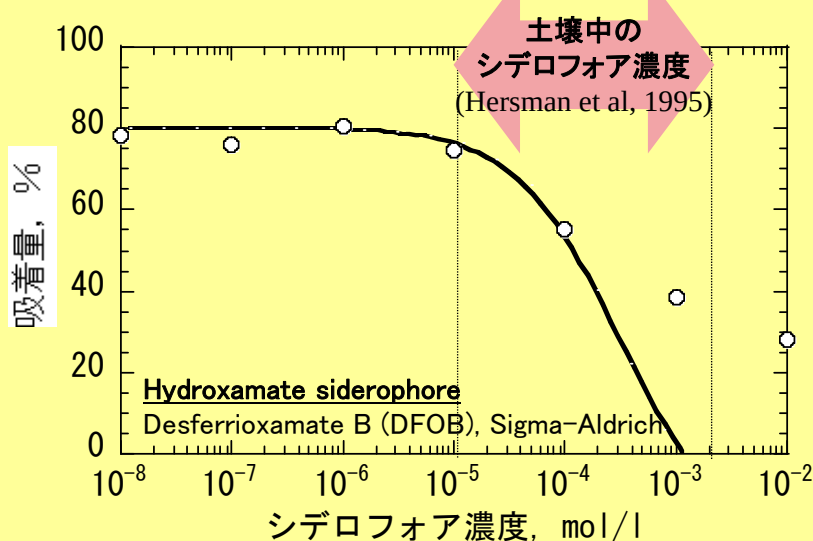
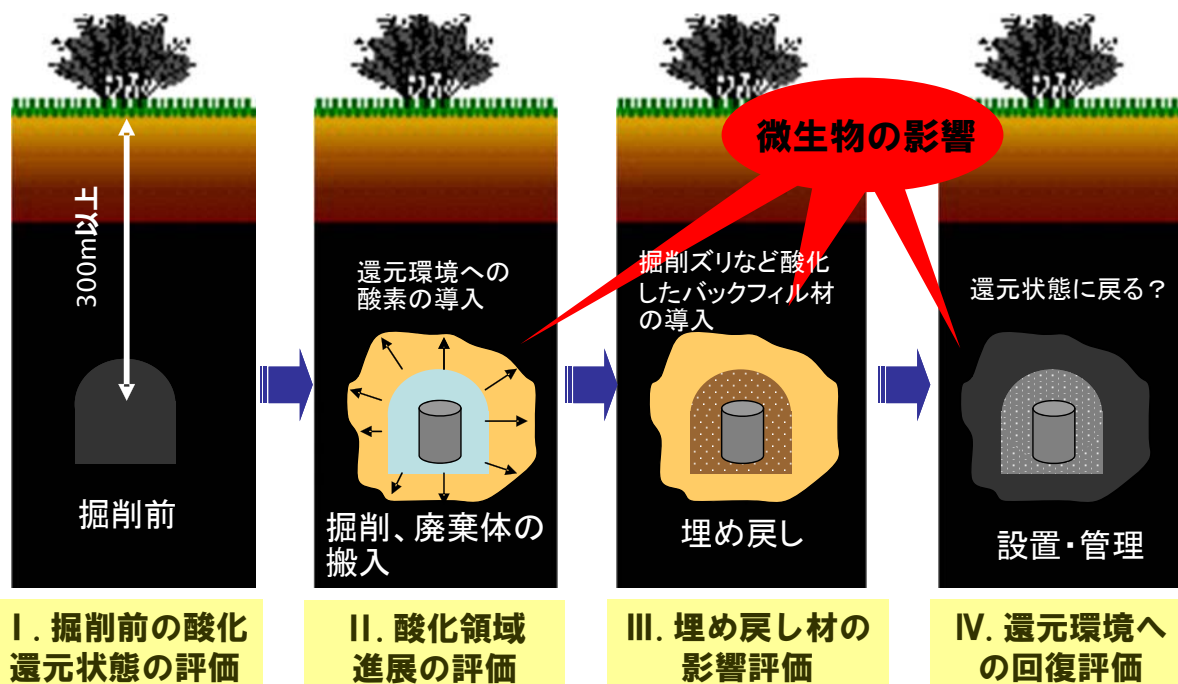


図 Pu(IV)のベントナイトへの吸着挙動に及ぼすシデロフォアの影響

吸着挙動は、キレーター濃度に大きく依存する
(土壌環境中では菌体周辺のみ！?)

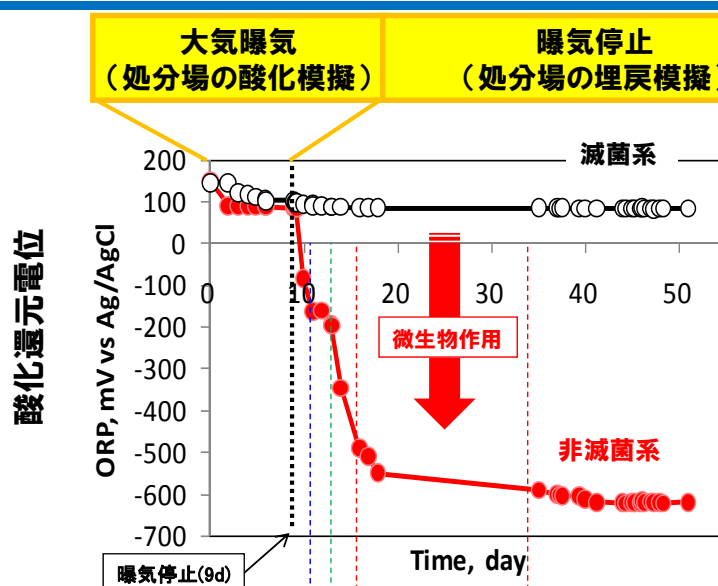
【目的】下記の現象を理解・モデル化し、最終的に定量的な予測評価コードを開発する。



処分場建設および操業時における処分場周辺の大気などによる酸化から埋め戻し後の還元状態への復帰に与える微生物影響の解明および定量的な評価技術の開発が望まれている

9

まとめ：幌延試料を用いた酸化還元模擬試験



幌延サイトの地下環境の還元環境形成に関与している微生物反応

発酵
鉄還元
好気呼吸

<寄与している菌種>
(発酵菌)

金属還元菌 *Shewanella* 属など
好気性菌 *Pseudomonas* 属など

幌延堆積岩懸濁液の酸化還元電位の低下には微生物反応(好気呼吸→鉄還元→発酵反応)が逐次的に関与していることが明らかとなった。

10

微生物影響評価モデルのプロトタイプ モデルの改良・精緻化



PHREEQCにおける複数微生物代謝群の代謝活動微生物増殖速度 r_x

$$r_x = I_{th} Y_{k_{oc}} \frac{C_s}{K_s + C_s} \frac{C_a}{K_a + C_a} \frac{K_I}{K_I + C_I} X - \beta X$$

・阻害因子

微生物増殖速度は電子受容体の濃度で変化する。各微生物群はエネルギー効率の高い電子受容体により、微生物活動が阻害されるように設定（例：脱窒菌 酸素により阻害）

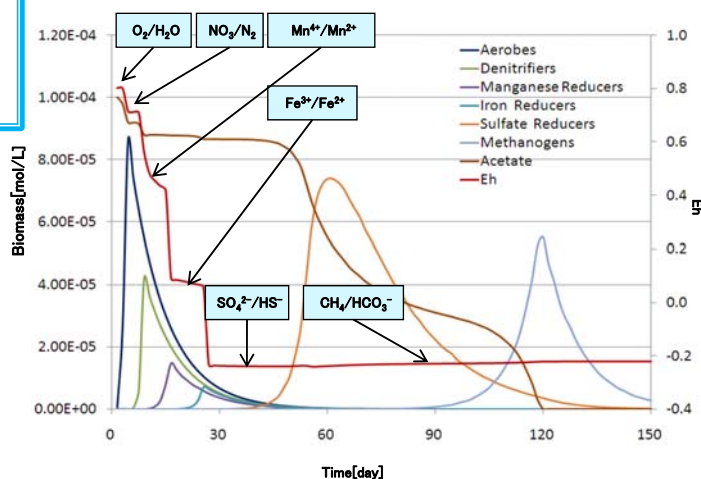
・スイッチ機能 I_{th}

各微生物群の活動範囲を電子受容体および電子供与体濃度で区切りその範囲で微生物が増殖するように設定

初期条件

項目	初期値	単位
pH	7	-
pe	8	-
Na ⁺	0.002 mol/l	
Cl ⁻	0.001 mol/l	
O ₂	3.00E-04 mol/l	
NO ₃ ⁻	4.00E-04 mol/l	
SO ₄ ²⁻	8.00E-04 mol/l	
CO ₃ ²⁻	5.12E-03 mol/l	
Ca ²⁺	3.12E-03 mol/l	
Fe ²⁺	2.23E-18 mol/l	
Fe ³⁺	2.72E-08 mol/l	
Mn ²⁺	2.23E-16 mol/l	
酢酸	5.00E-03 mol/l	

項目	初期値	単位
好気性菌	1.00E-08 mol/l	
脱窒菌	1.00E-08 mol/l	
マンガン還元菌	1.00E-08 mol/l	
鉄還元菌	1.00E-07 mol/l	
硫酸還元菌	1.00E-08 mol/l	
メタン生成菌	1.00E-07 mol/l	



6微生物群を対象とした地下水化学変化のPHREEQCによる解析例

11

¹³⁷Csの環境動態

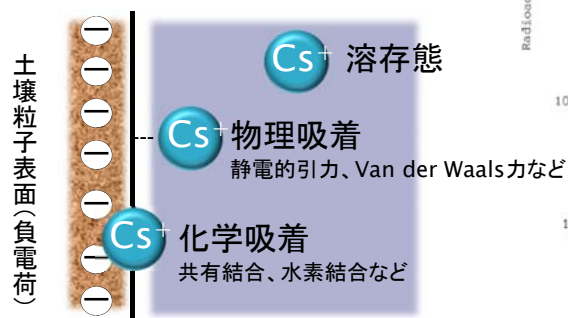


I-131, Cs-137,
(Sr-90)



土壌

- ・無機粒子(砂、粘土鉱物など)
- ・有機物(腐植、微生物など)



長崎県西山土壤中のCs-137の分布 (長崎原爆＋グローバルフォールアウト)

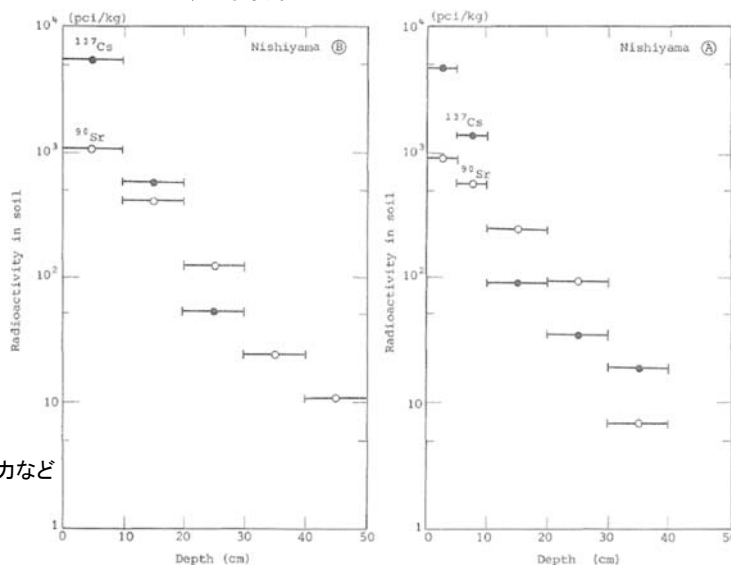
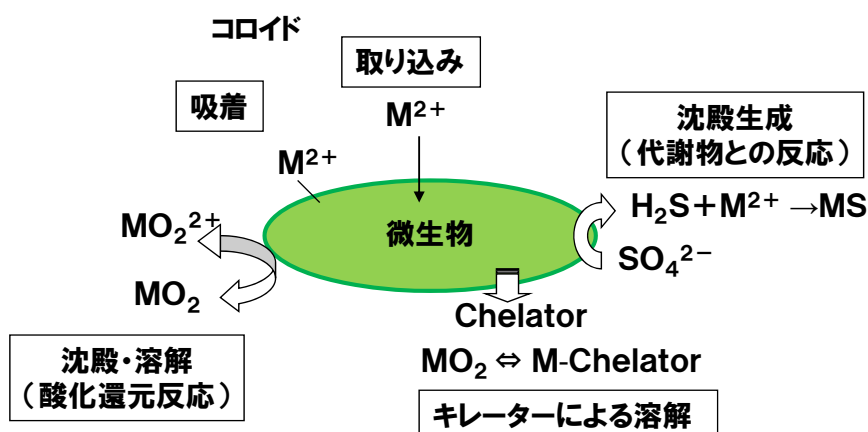


Fig.10 Vertical distribution of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in soil at Nishiyama (A) and (B)

馬原(1985):電研報告385027

Csは1価の陽イオンとして振る舞うため、負電荷の土壌粒子に収着されやすい

Cs-137は、40年経過後も土壌深さ約40cmに残留
→涵養水などではCsはあまり動かない。



放射性核種の地下水移行に及ぼす微生物影響

13

セシウムを濃縮する微生物

TABLE 3
Cs⁺ Uptake Levels, Removal Efficiencies and Concentration Factors in Microorganisms

Organism	K ⁺ concentration (μmol dm ⁻³)	Cs ⁺ concentration (μmol dm ⁻³)	Contact time	Cs ⁺ uptake ^a	Cs ⁺ removal ^b	Concentration factor ^c	Reference
Bacteria							
<i>P. aeruginosa</i>	—	—	—	—	—	1.6 × 10 ¹ (w)	95
<i>P. fluorescens</i>	—	10	—	nd	nd	nd	96
<i>Rhodococcus</i> sp.	—	10	48 h	19	47	3.6 × 10 ³ (d)	96
<i>R. erythropolis</i>	—	10	24 h	52	90	3.5 × 10 ⁴ (d)	96
Cyanobacteria							
<i>P. purpureum</i>	—	—	7 d	—	—	2.0 × 10 ² (d)	90
<i>Synechococcus</i> sp.	8000	0.008	24 h	nd	nd	nd	97
Microalgae							
<i>C. pyrenoidosa</i>	200	—	13 d	—	47	1.5 × 10 ² (w)	92
<i>E. intermedia</i>	200	—	11 d	—	82	7.1 × 10 ² (w)	92
<i>C. moewusii</i>	26	7.5	24 h	—	—	3.0 × 10 ² (w)	17
<i>C. pyrenoidosa</i>	15–120	—	5 d	—	83–88	2.3 × 10 ² (w)	91
<i>C. salina</i>	0	10	15 h	93	79	9.3 × 10 ³ (d)	81
<i>C. salina</i>	0	50	15 h	420	72	8.4 × 10 ³ (d)	81
Yeasts and fungi							
<i>S. cerevisiae</i>	—	—	—	—	—	3.7 × 10 ¹ (w)	95
<i>S. cerevisiae</i>	0	100	30 min	166	33	1.7 × 10 ³ (d)	89
<i>P. chrysogenum</i>	0	100	30 min	102	43	1.0 × 10 ³ (d)	89
<i>R. arrhizus</i>	0	100	30 min	67	33	6.7 × 10 ² (d)	89

^a Uptake levels given in μmol g (dry weight)⁻¹.

^b Percentage removal from solution.

^c Concentration factors expressed either as Cs⁺ g (wet weight)⁻¹/Cs⁺ cm⁻³ (w), or Cs⁺ g (dry weight)⁻¹/Cs⁺ cm⁻³ (d).

nd denotes where Cs⁺ uptake was not detectable.

Avery (1995) Microbial Interactions with cesium, J.Chem.Tech.Biotechnol.,62, 3-16

14

主な内容

□ 放射性核種の環境動態

(バックエンド領域の貢献:核種移行に及ぼす微生物影響など)

□ 東京電力との環境モニタリングに関する取り組み (警戒区域及び計画的避難区域における詳細モニタリング)

警戒区域及び計画的避難区域における詳細モニタリング

文科省HPより

文科省・内閣府の傘下にて、東電と共同にて実施。実施項目は以下の3つ。

- ①基礎データ収集モニタリング
(100mメッシュ)
- ②広域モニタリング
(2kmメッシュ内20点)
- ③個別詳細モニタリング
(住宅や道路など)

警戒区域及び計画的避難区域における詳細モニタリング実施計画について

平成23年6月13日
内閣府原子力被災者生活支援チーム
文部科学省

1. 目的

警戒区域及び計画的避難区域について、「環境モニタリング強化計画」の一環として、2kmメッシュで実施する土壌調査と整合性を図り、これを補完する調査を実施する。

2. 実施計画

警戒区域及び計画的避難区域を対象にした詳細な空間線量率の調査を実施する(実施者:電力中央研究所、東京電力)。

(1) 基礎データ収集モニタリング

基礎データを把握するため以下のモニタリングを実施する。

- ・実施時期:6月13日~6月下旬(予定)
- ・調査場所:浪江町駅付近、富岡町駅付近の2kmメッシュ地点(都市部を選定)
- ・測定点:上記2地点を100mメッシュに区切り400地点で空間線量率を計測

(2) 広域モニタリング

基礎データを元に、以下の調査を行う。

- ・実施期間:6月下旬~8月下旬(予定)
- ・調査場所:警戒区域と計画的避難区域を2kmメッシュ(全217メッシュ)とし、1メッシュ20点程度を選定、順次計測する。
(ただし、アクセス困難な場所、森林等人が住んでいない場所は除外)

(3) 個別詳細モニタリング

個別モニタリングは、広域モニタリングの結果を踏まえ、これら区域の環境改善対策の実施方法等の検討のための基礎データを得るため、住宅や道路、校庭などの詳細調査を行う。(6月中旬~10月末実施予定)

3. 今後の予定

これらの調査結果を踏まえ、住宅等の生活圏における放射性物質の除染についてのモデル事業を行い、今後の除染に向けた効率的・効果的な方法を収集する予定。

○本詳細モニタリング計画の目的と概要

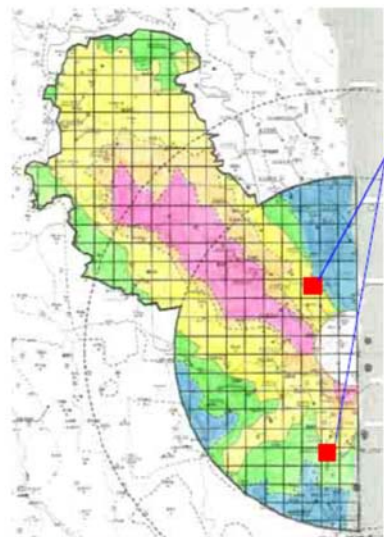
警戒区域および計画的避難区域について、「環境モニタリング強化計画」の一環として、2 kmメッシュで実施する土壌調査と整合性を図り、これを補完する調査を実施する

- ・広域モニタリングは、警戒区域と計画的避難区域を2 kmメッシュに区分し、各メッシュ内の土地利用形態など多様な環境における空間線量の状況（特に高い線量のポイント）を把握する
- ・個別モニタリングは、広域モニタリングの結果を踏まえ、帰宅に向けた環境改善対策をどこにどのように実施すべきかの検討の基礎データを得るべく住宅や道路、校庭などの詳細な調査を行う

広域モニタリング

実施期間：6月13日～8月下旬頃（予定） ※継続実施については別途検討

（実施者：電力中央研究所、東京電力）



- (1) 警戒区域と計画的避難区域を2kmメッシュにする（全217メッシュ）
 ※ 警戒区域（20km圏内）は、文科省と整合し実施。
 計画的避難区域については、避難完了後実施。

- (2) 2kmメッシュ図より、2地点（対象地域内で都市部で多様な環境を有する浪江町・富岡町駅付近※事前選定調査実施予定）を選定する。

- (3) 基礎データ収集モニタリング
 上記2地点にて、100mメッシュ（400点）で空間線量を網羅的に計測を行い、多様な環境の線量LVを把握し、全体計画の基礎データとする。



- (4) 広域モニタリング
 (3)で得られた基礎データを基に各メッシュの計画を立案し、1メッシュ20点程度を順次計測していく。
 (217メッシュ×20点程度=約4,340点)

個別詳細モニタリング

実施期間：6月中旬～10月末頃（予定） ※継続実施については別途検討

（実施者：電力中央研究所、東京電力）

高線量エリアを中心に所有者の了解を得た箇所について実施

空間：モニタリングカーによる計測を実施

土壌・森林：線量の高い田、畑、校庭の深度分布を調査

人工物：住宅および道路の汚染状況の調査

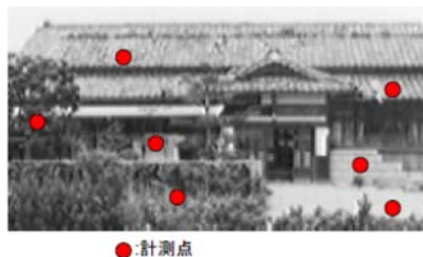
水：水道水（浄水場の上流域）、水環境（貯水池他）を調査

個別モニタリングの例

このほか、土壌の深度方向の汚染分布や道路の横断面のモニタリングも実施



空間線量・周辺画像の記録



戸建の放射線量・ダスト測定



浄水場・上流域の線量測定・核種分析

今後の対応

（実施者：未定）

これらの調査結果を踏まえ、住宅等の生活圏における放射性物質の除染についてのモデル事業を行い、今後の除染に向けた効率的・効果的な方法を収集する予定です。

基礎データ収集モニタリング結果（7/1文科省HP掲載）

【実施期間】

平成23年6月13日～6月23日

【調査場所（右図）】

浪江駅及び富岡駅付近の2kmメッシュ地点

【測定点】

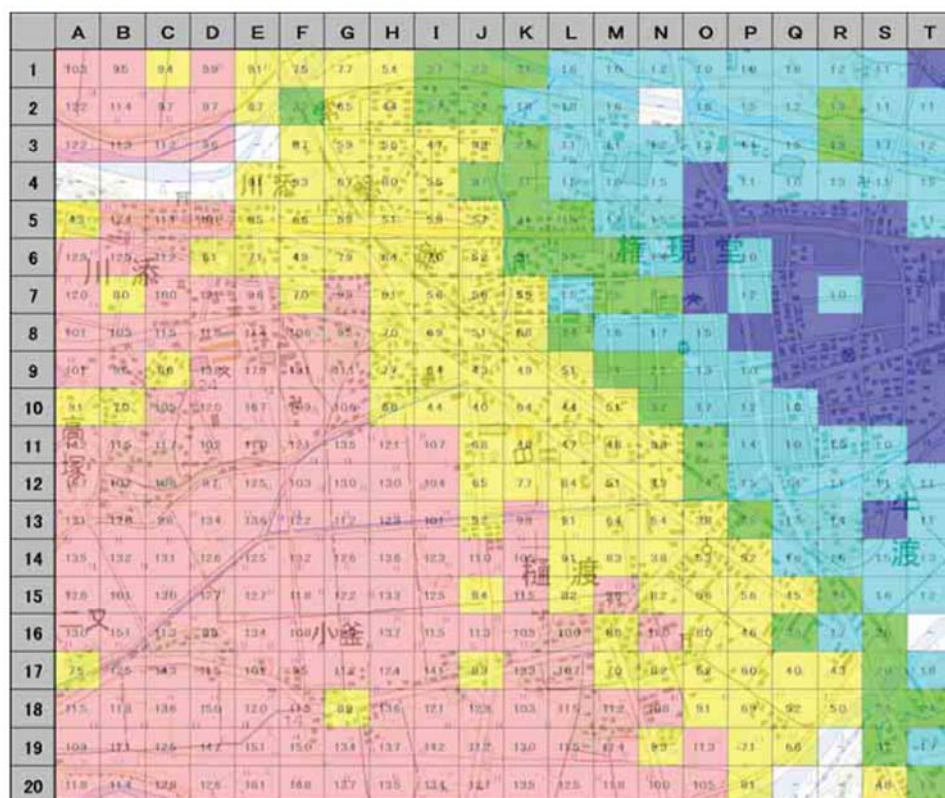
上記2地点を100mメッシュに区切り、
各々400地点で空間線量率を計測
（地上高1m、地上高1cm）

【実施者】 電力中央研究所、東京電力



浪江駅付近のモニタリング結果（地上1m）

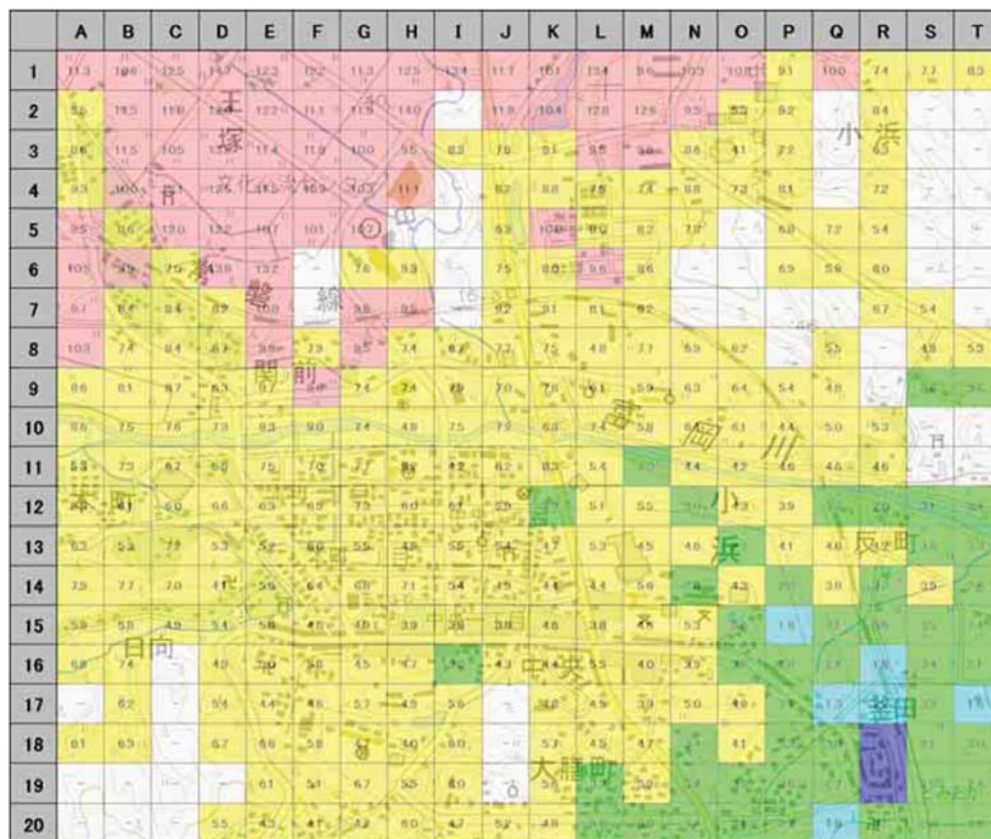
別紙3-2



背景地図：電子国土

6段階(μSv/h)			
1	<	1.0	
2	1.0	～	1.9
3	1.9	～	3.8
4	3.8	～	9.5
5	9.5	～	19.0
6	19.0	～	91.0
-	計測不可		

富岡駅付近のモニタリング結果(地上1m)



背景地図:電子国土

6段階(μSv/h)				
1	<	1.0		
2	1.0	~	1.9	
3	1.9	~	3.8	
4	3.8	~	9.5	
5	9.5	~	19.0	
6	19.0	~	91.0	
-	計測不可			

結果のまとめ(今回の測定で得られた知見)

<全般>

- ・2kmメッシュ内においても、線量にばらつきがある
浪江駅：0.5~17.9 μSv/h（地上1m高） 0.5~25.4 μSv/h（地上1cm高）
富岡駅：0.2~14.7 μSv/h（地上1m高） 0.5~39.1 μSv/h（地上1cm高）
- ・線量分布結果は、文科省及び米国DOEによる航空機モニタリング結果とほぼ合致

<土地利用形態など>

- ・地表面が土などの場合
→一般的に地表面に近いほど高い値を示す
- ・道路や駐車場など広いアスファルト面の場合
→周囲の線量率より低い値を示す傾向を示す。
- ・比較的大きな屋根（カーポートなど）の下
→線量測定値は低い傾向を示す
- ・住宅地に点在する林
→周囲の線量率より高い傾向を示す
- ・草地や田畑
→線量測定値は高い傾向を示す。

今後の予定

(1) 東京電力との連携

- ① 基礎データ収集モニタリング(100mメッシュ)
- ② 広域モニタリング(2kmメッシュ内20点)
- ③ 個別詳細モニタリング(住宅や道路など)

(2) 所内研究の実施

