

水圏環境修復に向けた取り組みとその実例:

August, 2013

大西康夫

Pacific Northwest National Laboratory Washington State University

環境除染に必要な要素



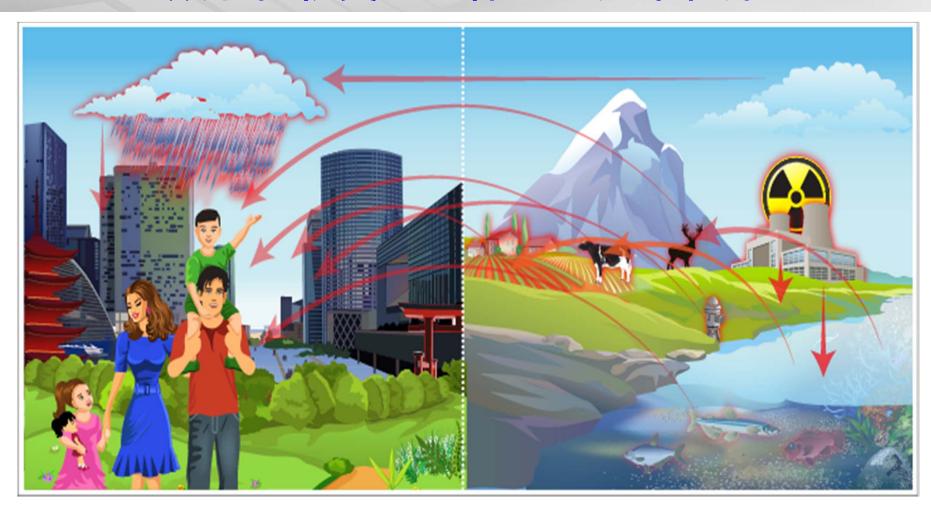
Proudly Operated by Battelle Since 1965

人々の保護の為:

- 環境除染評価を除染作業以前、中、以後に行う
 - 重要な汚染経路を見分け、その経路の除去
 - セシウムの環境中での動態を把握
 - セシウム吸着・脱着
 - 環境中でのセシウム移行と蓄積
 - モニタリングは非常に重要、しかしそれだけでは十分ではない
- 環境除染・健康保全・地元産業活動は現在と将来のセシウム環境分 布を考慮する必要がある
 - 除染作業の最適化
 - 生活の安全性と経済手段の長期保障
 - 例:農業・酪農再開の影響
 - 清潔な水が必要
 - カリウム、アンモニア肥糧は植物のセシウム吸収を減らすのに有効
 - カリウムや酪農からのアンモニアの流入 → セシウム脱着 → 河川水の汚染
 - 再汚染を避ける
- 水圏環境(河川・湖・河口・沿岸・地下水)の除染作業と限定を考慮する

放射性物質の人体への汚染経路





- 環境中のセシウムの濃度を下げる
- セシウムの汚染経路を削除

被ばく経路の重要性比較(陸上経路)。。」。



空中に放出されたセシウムの汚染経路による濃度(Bq/m3)から被ばく量 (Sv)の換算係数(NCRP123)

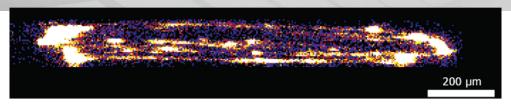
放射能 物	半減期	呼吸吸入	プール ム	地面	野菜	ミルク	肉	土壌	合計
¹³⁴ Cs	2.062y	9.910 ⁻⁵	2.010 ⁻⁶	4.210-2	1.310-2	3.410-2	4.310-2	6.810 ⁻⁴	1.310 ⁻¹
¹³⁷ Cs	30.0y	6.810 ⁻⁵	6.510 ⁻⁷	9.910-2	2.310-2	4.110-2	5.110-2	3.110 ⁻³	2.210-1
⁹⁰ Sr	29.12y	2.810-3	-	-	7.310-2	4.610-2	5.810-2	8.010 ⁻³	1.910 ⁻¹
²³⁸ Pu	87.74y	5.010-1	1.110 ⁻¹⁰	1.810-4	2.510-1	8.910 ⁻⁵	2.210-3	1.410 ⁻¹	8.910-1
²³⁹ Pu	24065y	5.510-1	1.010 ⁻¹⁰	8.810 ⁻⁵	2.710-1	9.910-5	2.510^{-3}	1.810 ⁻¹	1.010+0
²⁴⁰ Pu	6537y	5.510-1	1.010 ⁻¹⁰	1.910 ⁻⁴	2.710-1	9.910 ⁻⁵	2.510-3	1.810 ⁻¹	1.010+0

• 134Cs137Cs: 地面の汚染度減少と汚染された肉の消費を減らす

• 90Sr: 汚染された野菜と肉の消費を減らす

• ^{238,239,240}Pu: 空中への土壌再浮遊の防止と汚染された野菜の消費を減らす

地質・水質によるセシウム吸着性の変化が NOTIONAL LABORATORY



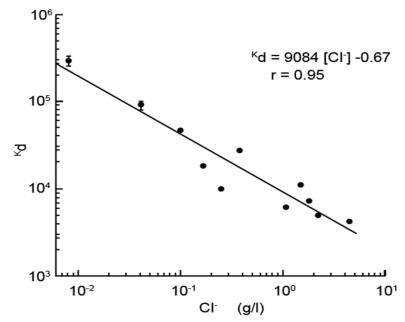
セシウム は細かい土壌と雲母系の鉱物に強く選択的に吸着細かい土壌からセシウムを抽出するのは困難 地下水汚染は少ない 河川:

DISTRIBUTION COEFFICIENT, m1/g 粘土鉱物とナトリウム水質 104 ILLITE 103 BIOTITE 10² HYDROBIOTITE MONTMORILLONITE 10¹ KAOLINITE 6x10⁻⁸ g Cs/1.0 g CLAY 0,001 0, 01 1.0 SODIUM CONCENTRATION, M

河川: 殆ど土壌に吸着

KとNH₃の肥料使用はセシウムを河川水に脱着 真水では殆ど脱着せず、海水では脱着

水中の塩素、カリウム、ナトリウム



セシウムで汚染された土壌の幾つかの除染方法Northwest

技術	記述	備考
掘削	上層部の土を掻きとり、洗浄するか、 廃棄する	新しい土か、洗浄された土と入れ 替かえない限り表土の損失
隔離	人工的に覆う	隔離により汚染物の露出をさける。
セメント固化	セメントの注入による固体化。	汚染物を·隔離する。 将来の土地利用を制限する。
現地での濾過	酸、イオン交換や 錯化物(クエン酸塩 等)による濾過	浅い土地に最も適切。過剰に使用され た時は濾過水の回収が必要。制御でき ない汚染物移行の危険性あり。
物理的、放射能度等で土壌選 別	高い濃度の土壌と低い濃度の土壌と 選別	十分発展した技術。 効果は地質による
現地外での土壌洗浄	水や抽出溶液で土壌洗浄してセシウ ムを抽出	効果は地質による

ハンフォード汚染地の除染土壌の除去と処分 NATIONAL LABORATORY



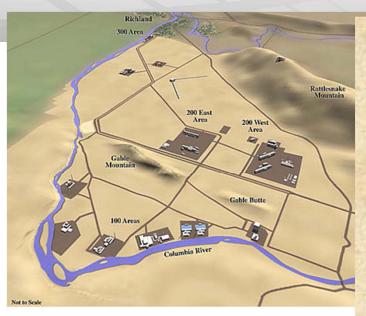


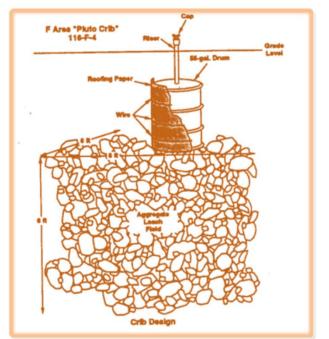






汚染された米国ハンフォードの雲母系土砂からの137Cs 除去で





137Cs抽出溶液の抽出結果 (最適化以前の抽出溶液) 粒径 2.00 – 0.25 ミリの土

抽出溶液濃 度	抽出前の ¹³⁷ Cs 濃度 (Bq/kg)	抽出後の ¹³⁷ Cs 濃度 (Bq/kg)	¹³⁷ Cs 減少率 (%)
0.25	9.6E+03	2.7E+03	72
0.50	9.6E+03	2.1E+03	78
1.00	9.6E+03	1.6E+03	83
0.25	4.2E+03	1.5E+03	64
0.50	4.2E+03	1.0E+03	76

137Csの抽出作業は温度96度で6時間行った。 (PNNLの化学性抽出溶液は無毒、バイオディグレイアブル)

環境除染決定の地元参加



Proudly Operated by Battelle Since 1965





Tri-Party Agreement

- 国と県との拘束力を持つ長期除染作業協定
- 地元参加の要求の義務付け
 - ハンフォード諮問委員会
 - 多様な32関心組織の組み合わせで構成
 - 全員同意で推奨事項・アドバイスを作成
 - ▶ 地元参加の為の地元グループの促進
 - > 除染度と時期の決定に参加
 - > 汚染土壌と地下水の除染
 - > 放射性物質の
 - > 処理
 - > 処分
 - ▶ 輸送
 - ▶ 将来のハンフォード土地利用
 - > 将来の地元産業の開発

水圏(河川, 湖、海)環境特性



- 動的
- ▶ 複雑
- ▶ 長時間
- ▶ 水理機構により変化の連続
- ▶ 放射性物質特性 (長時間の半減期と高い分配係数を持つ放射性物質)
- ▶ 放射性物質形態
 - 溶解性放射性物質
 - 水と共に移行
 - 土壌に吸着した放射性物質
 - 浮遊土壌と共に移動し、河床・海底土壌に蓄積
 - ◆ 河床・湖底・海底に蓄積
 - ◆ 河床・湖底・海底から再浮遊
- ▶ 最初の汚染地域から汚染されて無い地域に移行
- ▶ 沈殿で汚染された水底の放射性物質がさらに下流に移行
 - 汚染された水底が長期汚染源になる

Pacific Northwest

環境除染アセスメント

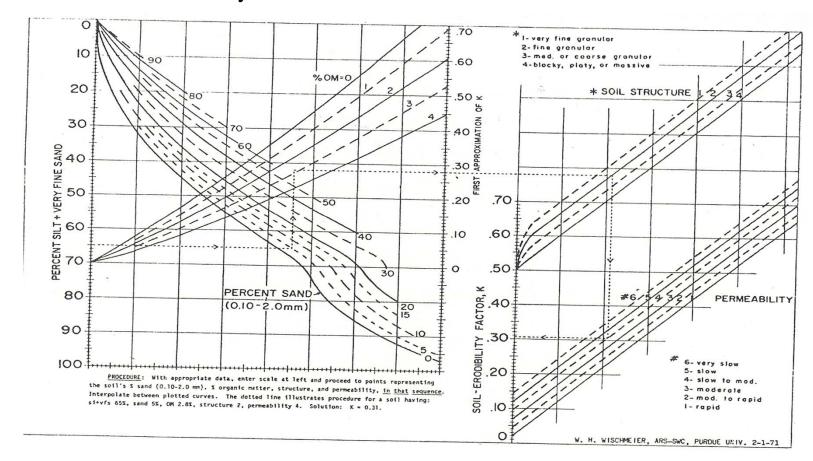
- ▶ 除染およびその他の対策案の設定
 - 環境モニタリング
 - 実験
 - アセスメント
 - 大雑把に全体を把握し、重要な場所、現象、特定の人達、等の選択とする為の 簡略化したアセスメント
 - ◆ 簡単な方法と単純なモデルを使う
 - 選別された重要な場所等での詳細アセスメント
 - ◆ 綿密な方法と詳細なコンピューターモデルを使う
- ▶ 除染およびその他の対策案決定
 - 詳細現地調査
 - 詳細実験
 - ■除染作業
 - 除染前、中、後の詳細アセスメント

全体を把握するためのスクリーニング方法の例: 雨水による地表土砂の侵食とその防止のアセスメント



Universal Soil Loss Equation $A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$

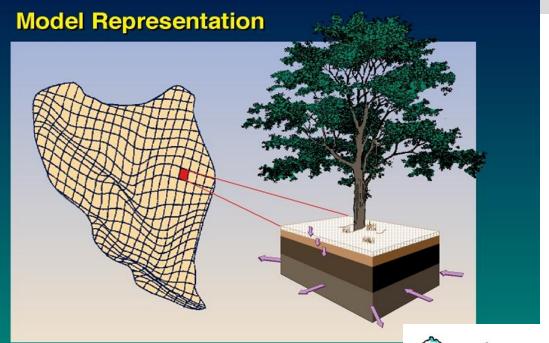
- A = Soil loss per unit area by runoff (tons/ha/given duration)
- R = Rainfall/snowmelt-runoff erosion index as a measure of erosive force
- K = Soil erodibility factor



詳細アセスメントの例:

PNNL Watershed Code: Distributed Hydrology Soil Vegetation モデル Acific Northwest NATIONAL LABORATORY

Proudly Operated by Battelle Since 1965



アイダホ州、Upper Big Wood Basinでの積雪



Observed (TM 30m resolution)



Simulated (DHSVM 180m resolution)

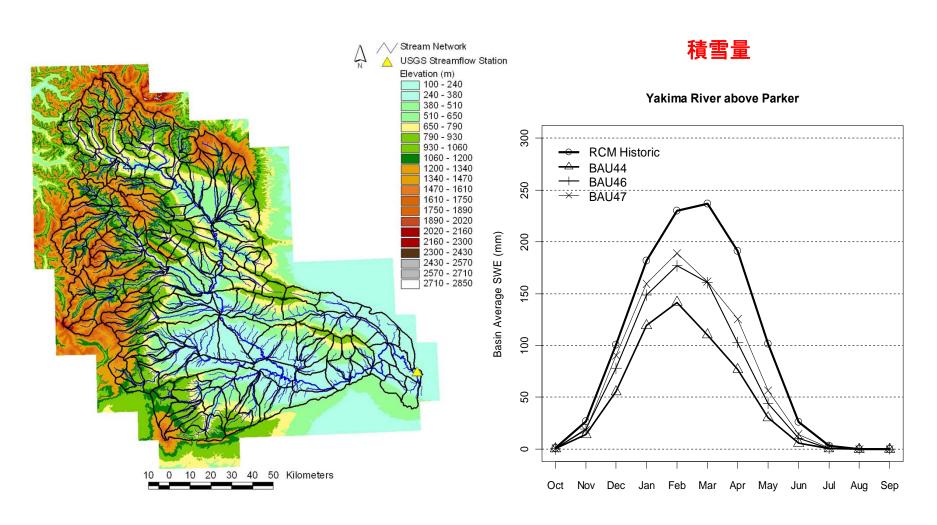
実測

モデル予測

ヤキマ川流域



Proudly Operated by Battelle Since 1965



Vail et al (2003)

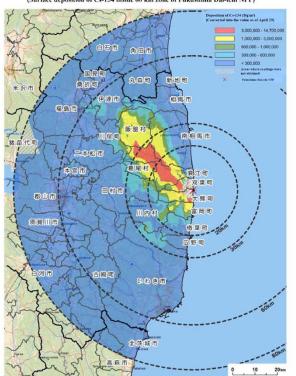
詳細アセスメントの例: 私のモデルとその河川、沿岸、海洋移行適応物Northwest Purely Operated by Ballelle Since 196

- 1次元TODAM、2次元FETRA、2次元SERATRA、3次元FLESCOTモデル
- 溶解性と土壌に吸着した放射性物質の水中での移行と河床・海底での蓄積
- 大、中、小河川
 - 請戸川(福島事故); コロンビア川(ハンフォード); テネシー、クリンチ川(オークリッジ); モータンダッド、サウスモータンダッド峡谷(ロスアラモス); キャタロガス、バターミルク、フランク川(ウエストバリー); ドニエプロ、プリピャト川(チェルノブイリ)、オブ、イルティッシュ、トボール、イセット川、タッチャ川(マヤック)、等
- 沿岸、海洋
 - •太平洋沿岸(東海村付近);太平洋深海(関東沖);アイルランド海(セラフィールド); カラ海(ロシアの放射性物質の海洋投棄)、大西洋(米国の放射性物質の深海海洋 投棄);ボーフォート海;メキシコ湾;バザーズ湾;スクイム湾;サンディエゴ湾等
- 河口付近
 - ハドソン川河口(インディアンポイント原発からニューヨーク市); ジェームス川河口、等

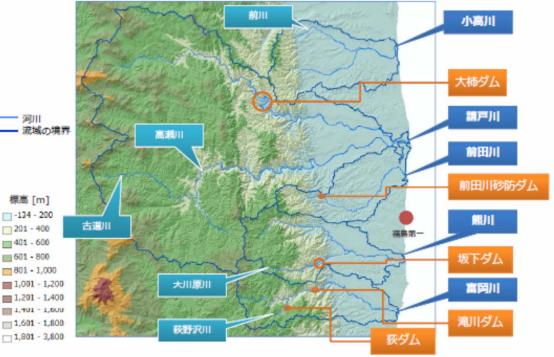
請戸川と高瀬川領域もモデリング(JAEA・PNN Lift Northwest LABORATORY

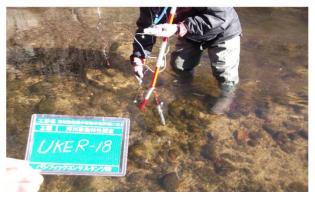
Proudly Operated by Battelle Since 1965

Results of airborne monitoring by MEXT and DOE (Surface deposition of Cs-134 inside 80 km zone of Fukushima Dai-ichi NPP)

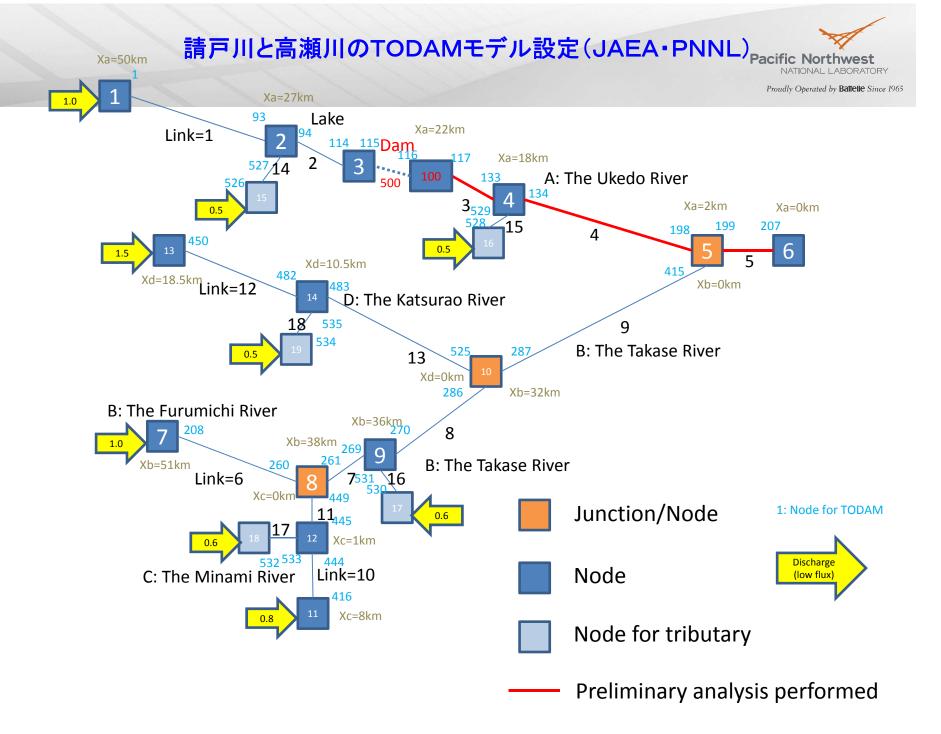


対象河川(5河川とその支流)の位置図









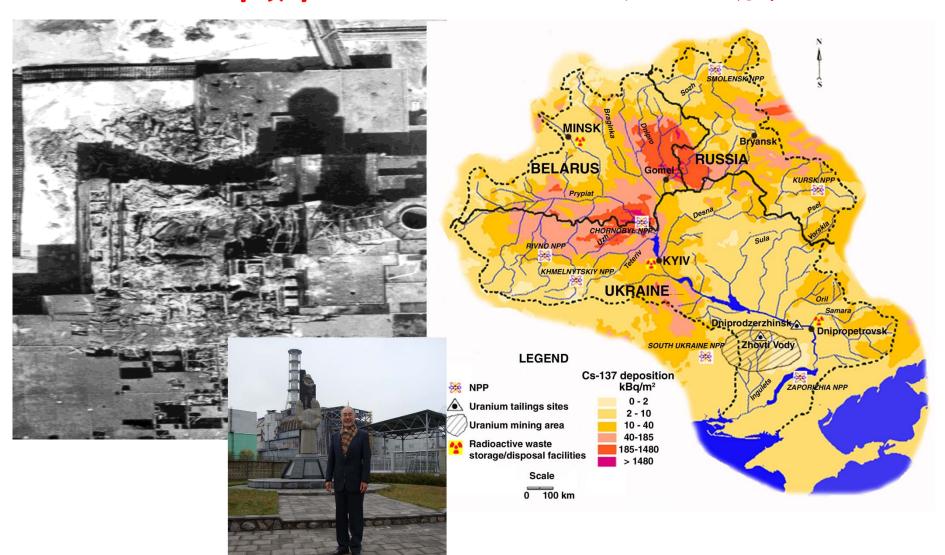
チェルノブイリ事故



Proudly Operated by Battelle Since 1965

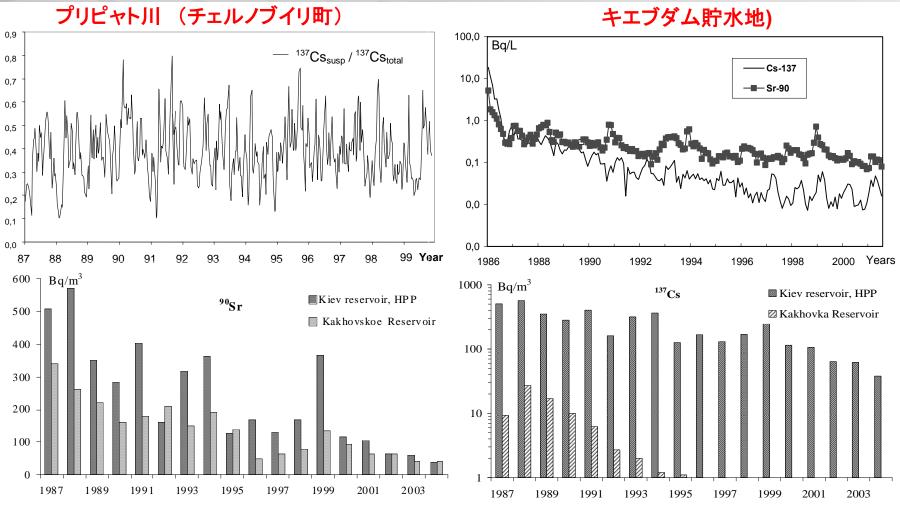
1986 事故時

セシウムー137分布



プリピャト川とドニエプロ川でのチェルノブイリの137Csと90Sr分析Northwest

Proudly Operated by Battelle Since 1965



- 浮遊土壌に吸着した137Cs: 時間がたつにつれて減少、多くは最初のキエブダムに沈殿
- •90Sr: 多くは溶解性で下流に移行、時間と共にあまり減少しない。.

(Onishi et al. 2007)

2千万人が使うドニエプロ河の汚染(TODAM1次元玉

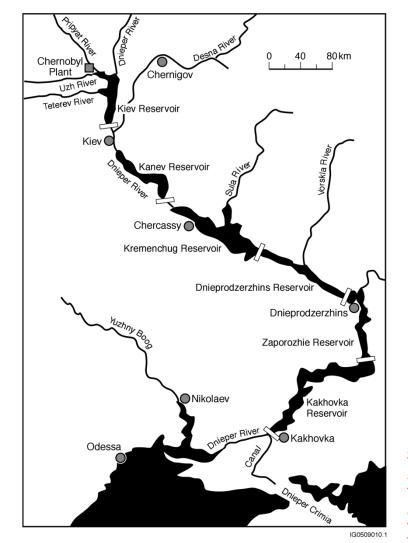
Proudly Operated by Battelle Since 1965

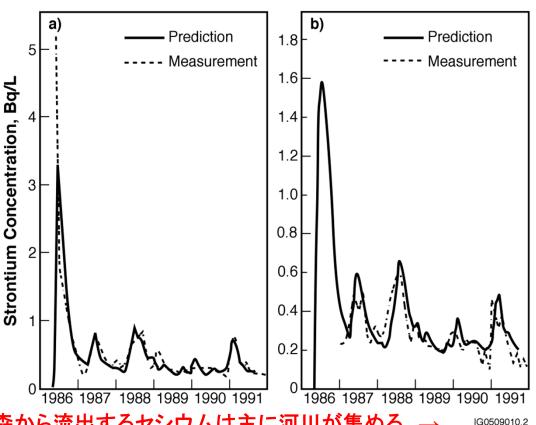
- 飲料水、灌漑用水、漁業、レクリエーッション、工業用水、運送
- 6つのダム 一洪水制御、水力発電、

キエブダム貯水池

カーネブダム貯水池

洪水の効果は明白

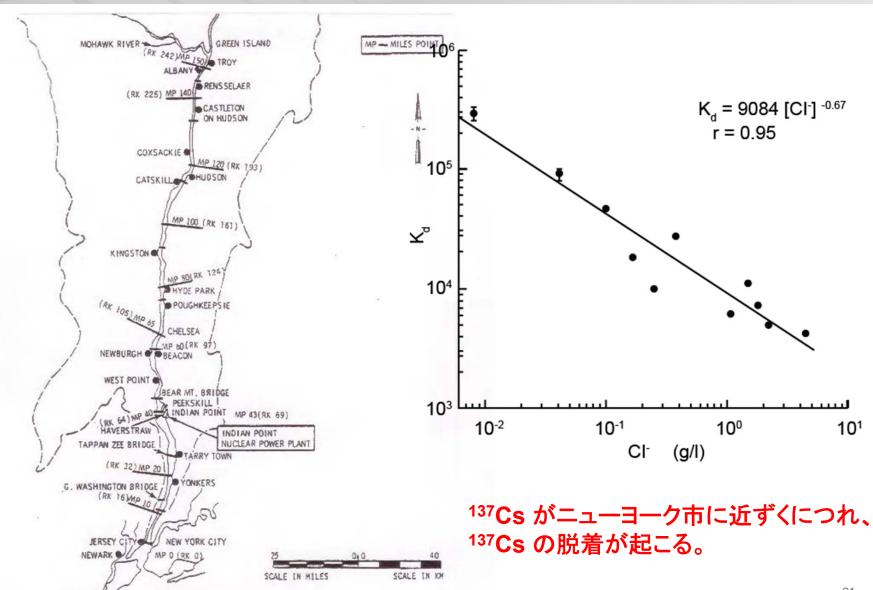




森から流出するセシウムは主に河川が集める → G000000. 溜池やダムは森から流出したセシウムの移行抑制に有効 溜池やダムは福島の森林から流出したセシウムの河川移 行抑制に使用の可能性あり。

ハドソン川河口付近のモデル地域

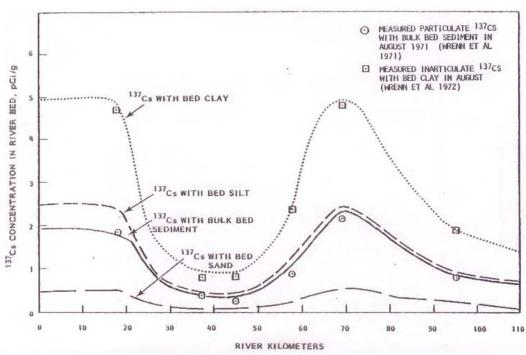




ハドソン川河ロシミュレーション結果

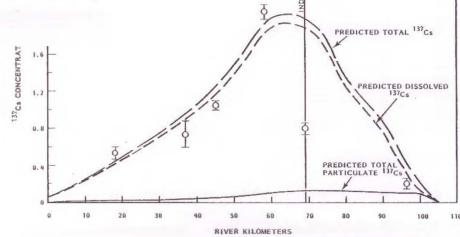


MEASURED TOTAL 137Cs (Wrenn et al. 1972)





- 浮遊シルト、粘土が河床に沈殿
 - 長期汚染源になる
- ¹³⁷Cs: 土壌から脱着
 - 溶解性 ¹³⁷Cs が(相対的に)増える

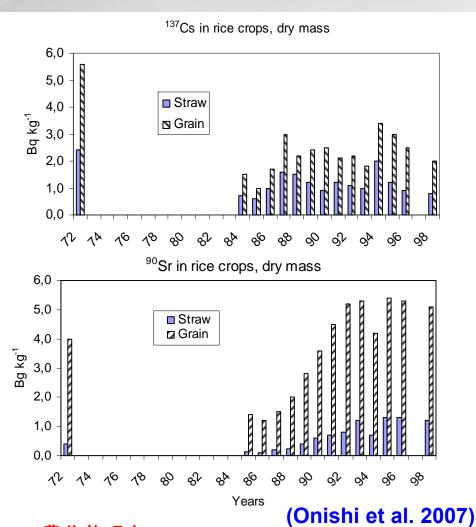


チェルノブイリ: 農作物の灌漑用水からの137Csと90Srの吸収ic Northwest

Proudly Operated by Battelle Since 1965

Culture or Part Used		Kakhovka Reservoir		Source of irrigation water ^(a)		
		¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	
Winter wheat	grai n	1.1- 1.9	0.1-0.3	0.30 - 0.40	0.07-0.11	
Corn	grai n	0.1– 0.4	0.07- 0.19	0.04- 0.07	0.01–0.03	
Alfalfa	hay	11.1– 22.8	3.7–11.1	1.85– 3.70	0.07-0.37	
Cabbage	hea	0.1 –	0.004-	0.04-	0.0004-	
	ds	0.3	0.015	0.07	0.004	
Tomato	frui	0.3–	0.02-	0.07-	0.004-	
	ts	0.7	0.04	0.03	0.037	
Cucumbers	frui ts	0.6– 1.5	0.37- 1.48	0.26- 0.37	0.07-0.01	
Red beet	roo	0.4–	0.001-	0.19–	0.001-	
	t	0.7	0.004	0.37	0.002	
Carrot	roo	0.37-	0.07-	0.15-	0.0004-	
	t	0.74	0.22	0.30	0.0007	
Vegetable	frui	0.19–	0.07-	0.07-	0.0002-	
marrow	t	0.26	0.11	0.20	0.0004	
Onion	oni	0.74–	0.01-	0.30-	0.0007-	
	ons	1.11	0.11	0.56	0.004	
Fennel her bs		1.11-	0.01-	0.37-	0.002-	
		1.85	0.02	0.74	0.006	

⁽a) Source is not the Dnieper River, and contamination has not been significantly affected by the Chernobyl accident.



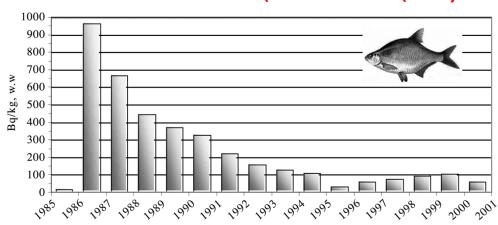
•農作物吸収:

•137Cs: 主に水性経路(根からではなく)

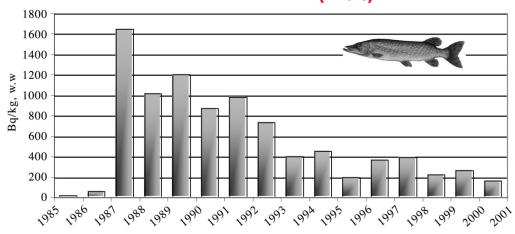
• 90Sr: 主に根 (土壌)からの経路

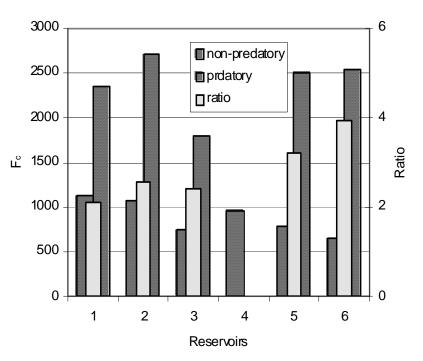
チェルノブイリ: 真水魚の137Csと90Srの吸収ific Northwest NATIONAL LABORATORY Proudly Operated by Ratiolle Since 19

ブリーム (タイ科の海魚)(草食)



カワカマス (肉食)





• 魚による吸収: 主に食物から

•¹³⁷Cs: 主に筋肉に蓄積

• 90Sr: 主に骨、えら、うろこ

サイズ効果がある場合がある。

(Onishi et al. 2007)

チェルノブイリ, Savannah River サイト: 川魚と湖の魚の137Csと90Srの吸収ific Northwest

Proudly Operated by Battelle Since 1965

Biota	Kiev Reservoir	Kremench ug Reservoir	Kakhovka Reservoir				
	137	'Cs					
High water plants	3508	1447	427				
Mollusks	294	190	560				
Fish	1037	343	340				
	⁹⁰ Sr						
High water plants	422	61.9	67.5				
Mollusks	28.3	35.0	87.0				
Fish	7.8	1.7	17.0				

Fish Species	Pripyat R. (Kiev Res.) 1992	Stracholesye (Kiev Res.) 1993	Chernobyl Cooling Pond 1994	Kozhanovskoe Lake 1994
Perch	13400	8280	7070	7170
Zander	-	-	6316	-
Pike	6130	8460	-	5440
Tench	3180	2680	-	-
Bream	1680	1540	1430	-
Crucian	-	-	2040	2060
Roach	-	1550	1370	2240
Silver bream	2170	1270	1160	-

- 137Cs: K+, Na+ (≥ 2 mg/L) を水に添加により減少
- 90Sr: Ca²⁺ (石灰) を水に添加により減少
- ・魚人口密度増加により、放射性物質吸収は減少

(Onishi et al. 2007)

水圏環境除染



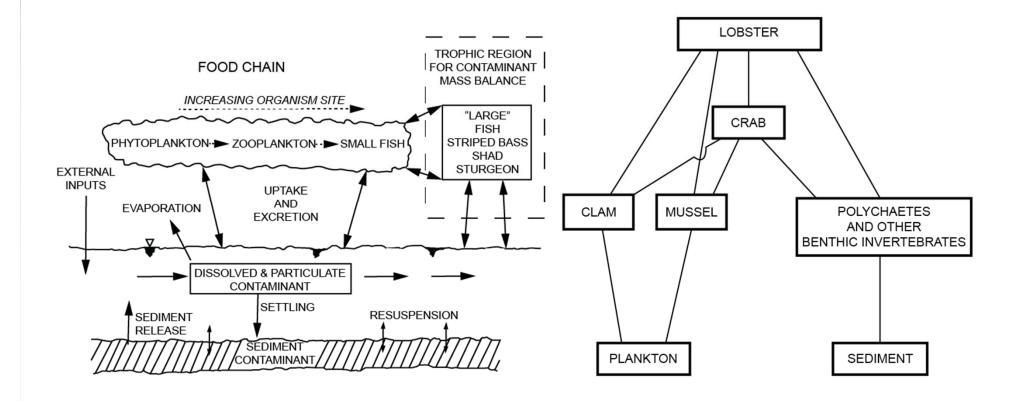
- ▶ 水から溶解性放射性物質の除去
 - ポンプと水処理(Pump and Treat)
 - 溶解性放射性物質には有効
 - 長期作業
 - ◆ 長時間
 - ◆ 多額の費用
 - 汚染水のバイパス・転送で重要な領域を避ける(例:人口の多い地域や貴重な水資源を 守る為に重要度の低い領域に汚染された地表水・地下水を転送)
 - 多額の費用
 - 汚染を別の場所に移す
- ▶ フィルター・化学薬品で溶解性放射性物質を抽出
 - ゼオライト やプルシアンブルーで¹³⁷Csを抽出
 - 燐灰石と柳の木で 90Srを抽出
 - 燐溶液でウランの抽出
- ▶ 汚染された水底土壌の除去
 - 広範囲を浚渫する
 - 作業は水底の放射性物質を水中に巻き上げる
 - 浚渫された水底土壌の処分の問題
- ▶ 除染作業決定への地元参加は非常に重要
 - 除染の度合いと時期
 - 地元経済発展

漁業再開の為:環境汚染評価と除染評価例fic Northwest

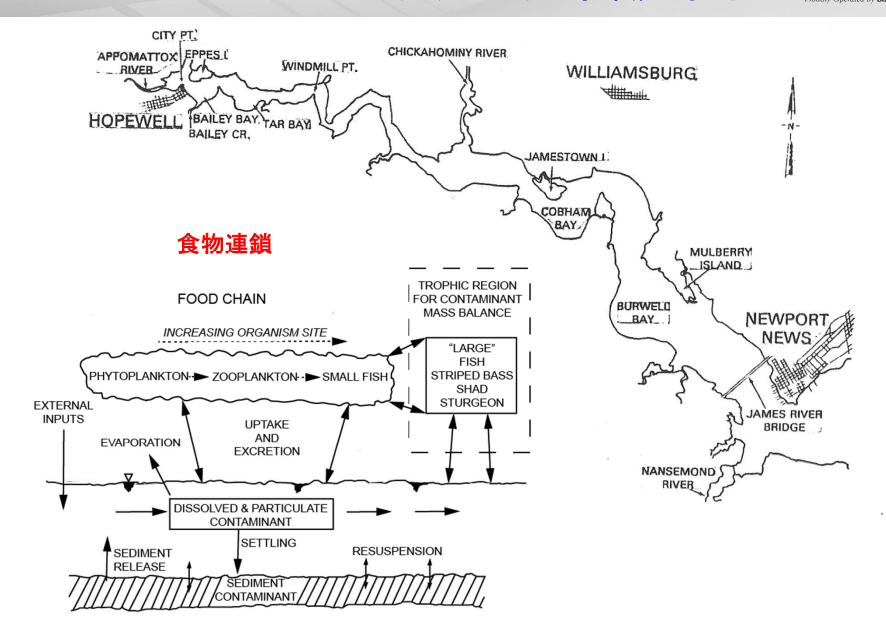
Proudly Operated by Battelle Since 1965

真水魚の食物連鎖

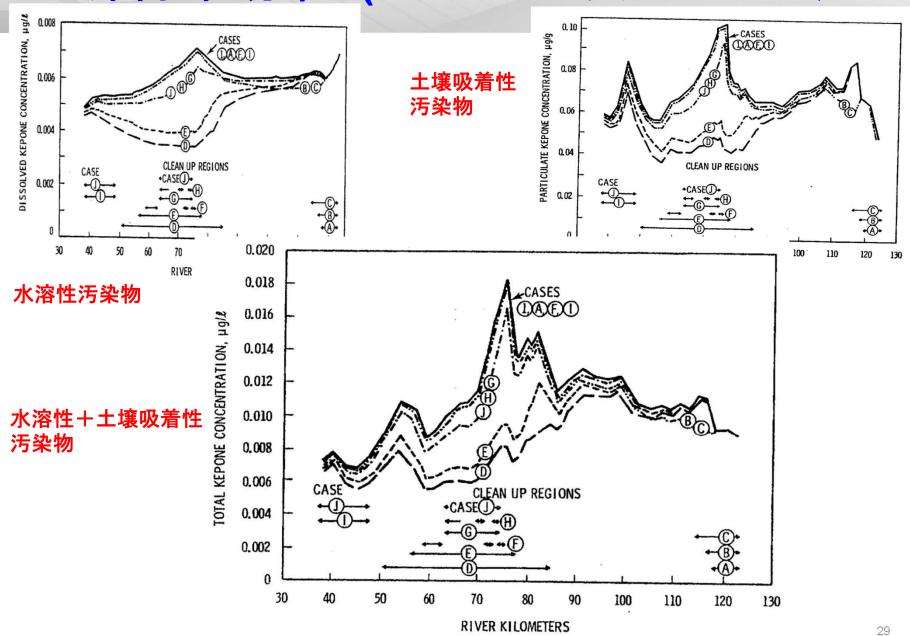
ロブスターの食物連鎖



ジェイムス川河口付近の汚染;漁業禁止Pacific Northwest NATIONAL LABORATORY



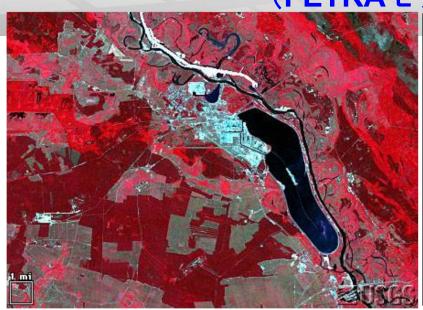
河床除染効果 (FETRA 2次元モデルル) orthwest

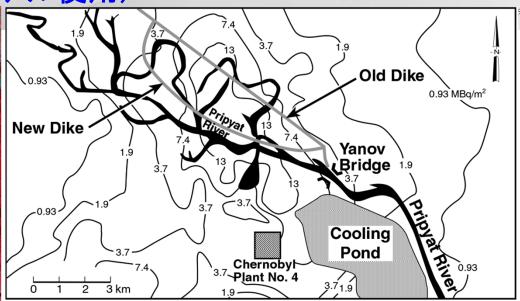


プリペット川の洪水(1991年の川の氷結)と除染効果評価

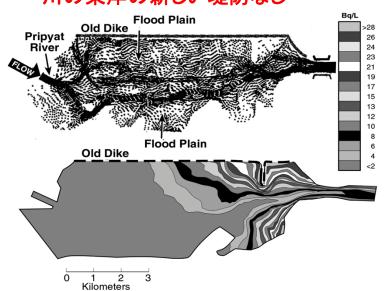
(FETRAモデル使用)



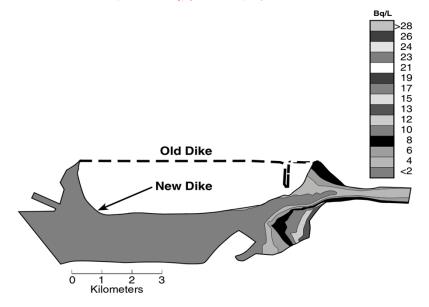




川の東岸の新しい堤防なし



川の東岸の新しい堤防あり



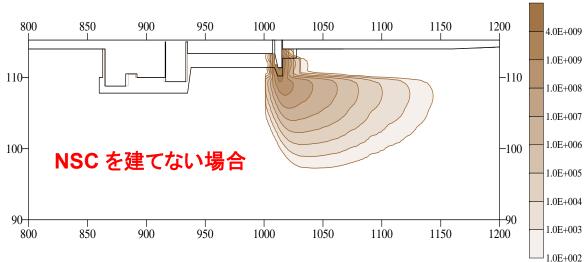
NSC の地下水汚染減少の効果。ific No National

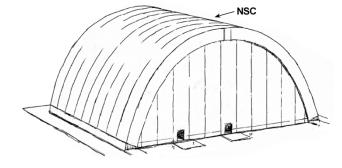
Proudly Operated by Battelle Since 1965

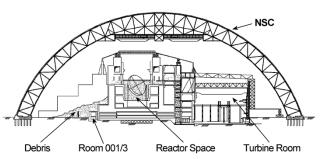
 Bq/m^3

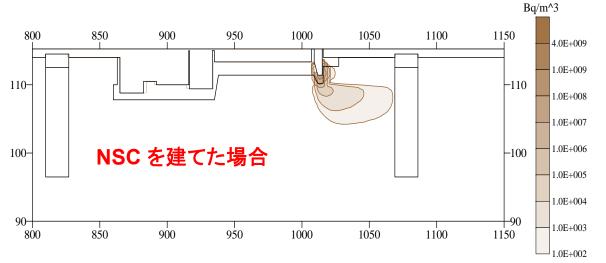


百年後の¹³⁷Csの地下水濃度









IG0509010.7

まとめ



- セシウム挙動は動的で複雑
- 除染評価を除染前、除染中、除染後の行う必要がある,特に除染前に
- 環境除染・健康保全・産業活動は現在と将来のセシウム環境分布を考慮する事が必要
 - 除染作業の最適化
 - 生活の安全性と経済手段の長期保障
 - 再汚染を避ける
- 水圏環境除染とその限定
 - 放射性物質が地表水と地下水に流入する事を避ける事が重要
 - 地表水と地下水が汚染された場合
 - 水圏環境 の動態を評価する
 - 広範囲のわたる除染が必要
 - 多額の費用と長時間
 - 除染効果は一般にあまり高くない
 - 廃棄物の処分の問題が起こる
- 除染作業決定への地元参加は非常に重要

二つのエネルギー大臣褒章授賞を受賞:2011編 Northwest

福島原発対策支援協力

メキシコ湾石油流出事故評価ッ Ballelle Since 1965



PNNL, DOE と日本政府・事業者にこれ等の仕事に携わせて頂き、感謝いたします。