

河川・湖沼等における放射性物質に係る 知見の整理

平成26年8月
環境省除染チーム

整理した知見の項目

- 河川・湖沼等の放射性物質について、これまでに集積された知見を整理した。
- ここでは、東京電力福島第一原子力発電所事故後の国内の調査によって得られた知見だけでなく、チェルノブイリ原子力発電所事故に関連する調査等、国外の調査についても有用な知見について整理した。

【整理した知見の項目】

<区分表示>

1. 河川・湖沼等における放射性Csの濃度等の状況

濃度等

2. 河川・湖沼等における放射線被ばくへの直接的な影響

被ばくへの影響

3. 河川・湖沼等における放射性Csの環境動態

環境動態

※今回の整理では、福島第一原子力発電所事故関連及びチェルノブイリの知見を対象とし、それぞれ、各ページの見出しの色で次のとおり区分した。

福島第一原子力発電所事故関連

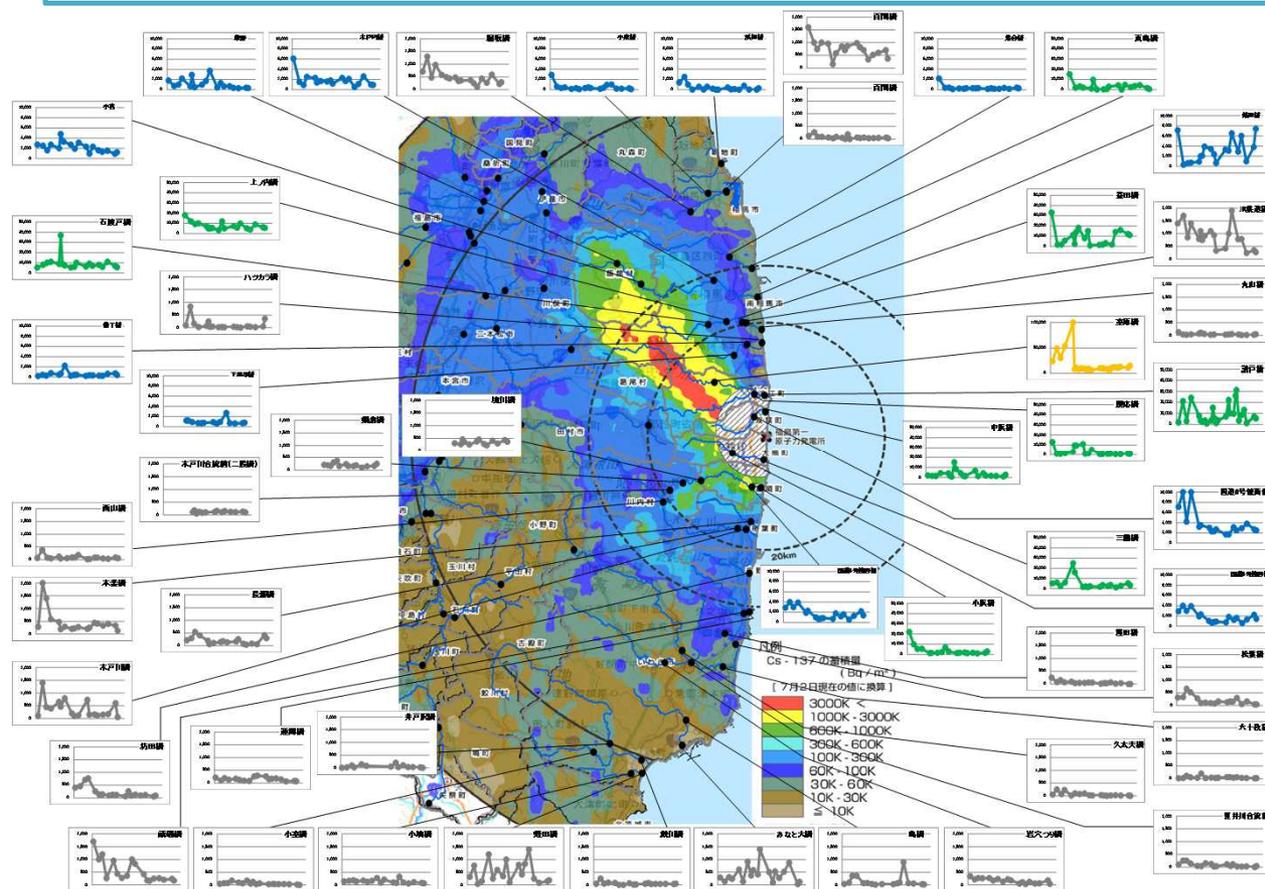
チェルノブイリ関連

○河川の水質

- 福島県内の123地点中、直近の調査(平成26年4月～6月採取分)で検出されたのは浜通りの1地点(1Bq/L)のみ。(検出下限値:1Bq/L)

○河川の底質

- 福島県内においては、概ね1,000Bq/kg程度以下であり、福島第一原子力発電所周辺地域など一部地点において比較的高い数値が見られる(平成26年4月～6月採取分)。
- 増減傾向については、ばらつきはあるものの、概ね横ばい又は減少傾向。



河川の底質のCs-137濃度の推移 (福島県浜通り)

【縦軸のスケール】

橙色グラフ・・・0～100,000Bq-Cs/kg

緑色グラフ・・・0～50,000Bq-Cs/kg

青色グラフ・・・0～10,000Bq-Cs/kg

灰色グラフ・・・0～2,000Bq-Cs/kg

【横軸】

2011年9月～2014年6月

(データ) 環境省:東日本大震災の被災地における放射性物質関連の環境モニタリング調査:公共用水域

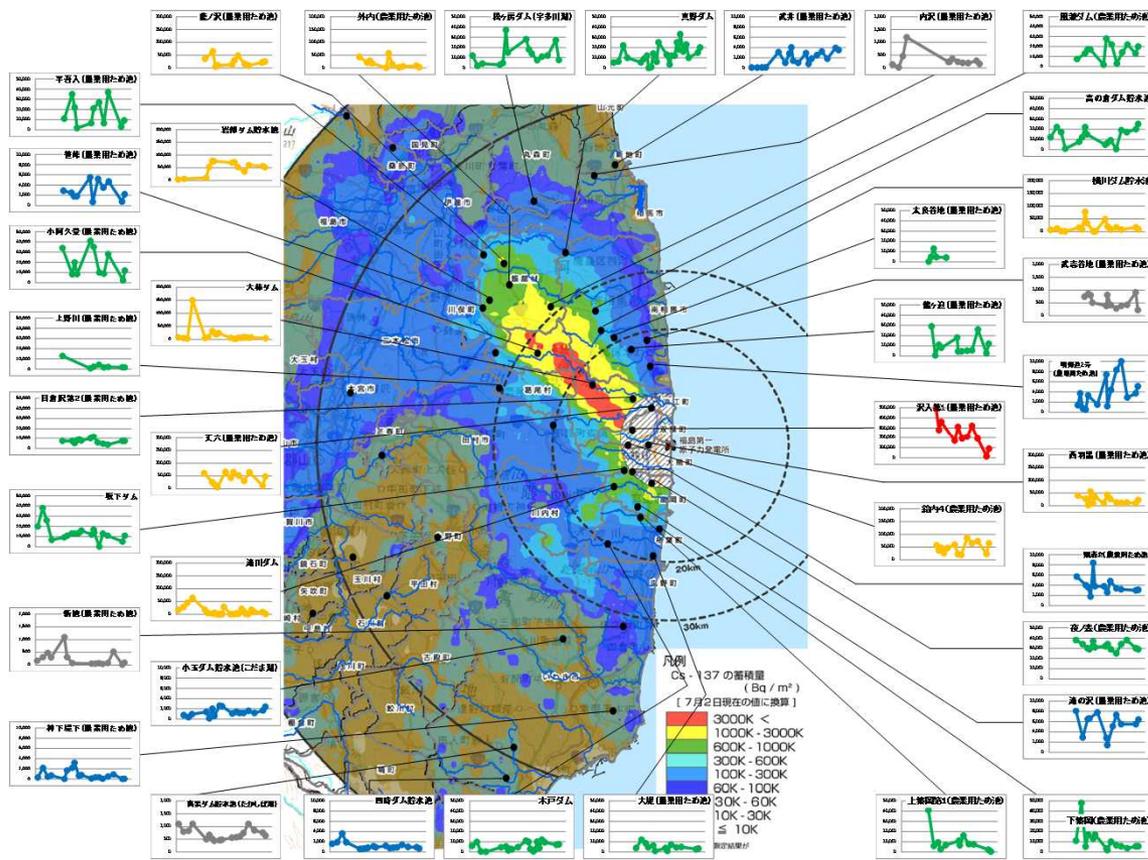
湖沼等の放射性Csの濃度の状況

○湖沼等(ため池・ダム含む)の水質

- 福島県内の湖沼・水源地84地点中、直近の調査(平成26年4月～6月採取分)で検出されたのは浜通りの8地点であり、最大で19Bq/L。(検出下限値:1Bq/L)
- 特に、水深の浅い地点など濁りやすい場所で検出されている。

○湖沼等(ため池・ダム含む)の底質

- 福島県内においては、概ね5,000Bq/kg程度以下であり、福島第一原子力発電所周辺地域など一部地点において、比較的高い数値が見られる(平成26年4月～6月採取分)。
- 増減傾向については、ばらつきはあるものの、概ね横ばい又は減少傾向。



湖沼等の底質のCs-137濃度の推移 (福島県浜通り)

【縦軸のスケール】

- 赤色グラフ・・・0～500,000Bq-Cs/kg
- 橙色グラフ・・・0～200,000Bq-Cs/kg
- 緑色グラフ・・・0～ 50,000Bq-Cs/kg
- 青色グラフ・・・0～ 10,000Bq-Cs/kg
- 灰色グラフ・・・0～ 2,000Bq-Cs/kg

【横軸】

2011年9月～2014年6月

(データ) 環境省:東日本大震災の被災地における放射性物質関連の環境モニタリング調査:公共用水域

○河川・湖沼等周辺の空間線量率

- 福島県内の河川・湖沼等の周辺における空間線量率(地上1m高)は、浜通りの一部地域を除き、概ね $1\mu\text{Sv/h}$ 以下(平成26年4月~6月調査結果)。
- 増減傾向については、空間線量率は、概ね減少傾向又は横ばい。

河川周辺の空間線量率の推移
(福島県浜通り)

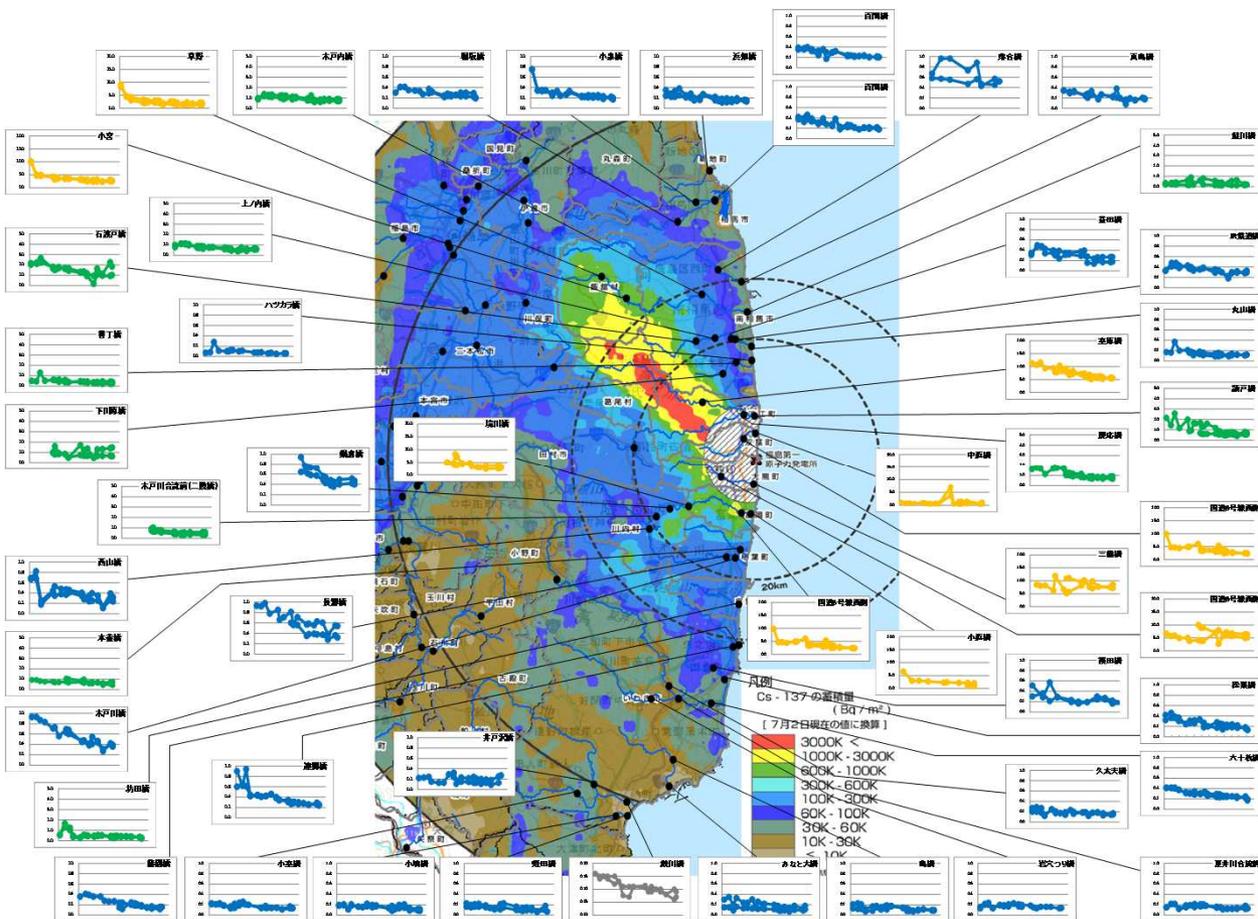
【縦軸のスケール】

- 橙色グラフ・・・ $0\sim 15.2\ \mu\text{Sv/h}$
- 緑色グラフ・・・ $0\sim 3.8\ \mu\text{Sv/h}$
- 青色グラフ・・・ $0\sim 1.0\ \mu\text{Sv/h}$
- 灰色グラフ・・・ $0\sim 0.23\ \mu\text{Sv/h}$

【横軸】

2011年9月~2014年6月

(データ) 環境省:東日本大震災の被災地における放射性物質関連の環境モニタリング調査:公共用水域



○周辺土壌濃度と空間線量率の関係(図1)

- 周辺土壌の放射性Cs-137濃度と空間線量率の間には一定の相関がある。

○底質濃度と周辺土壌濃度の関係(図2)

- 河川：底質の放射性Cs-137濃度は周辺土壌の濃度より低い傾向がある。
- 湖沼：底質の放射性Cs-137濃度は周辺土壌の濃度とほぼ同程度となる傾向がある。

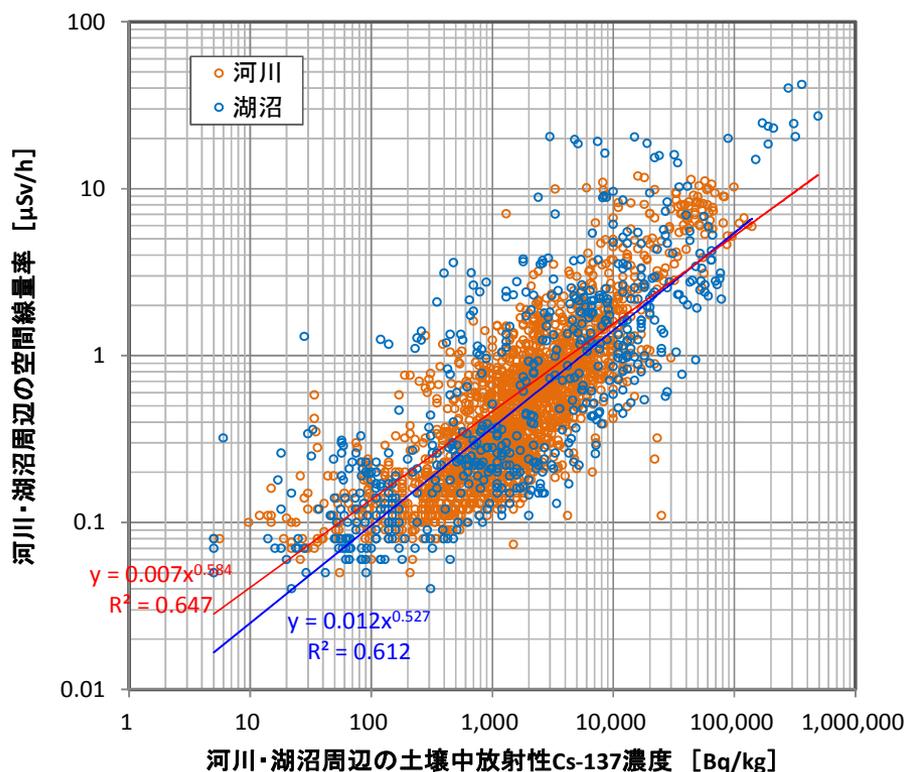


図1 河川・湖沼の周辺土壌中放射性Cs-137濃度と空間線量率の関係

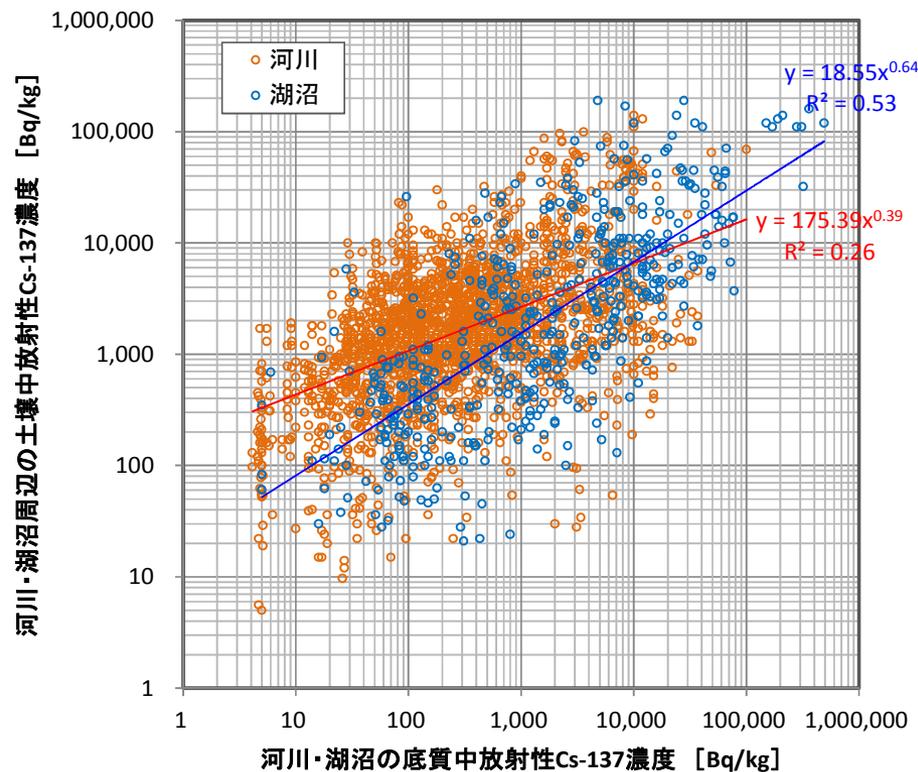


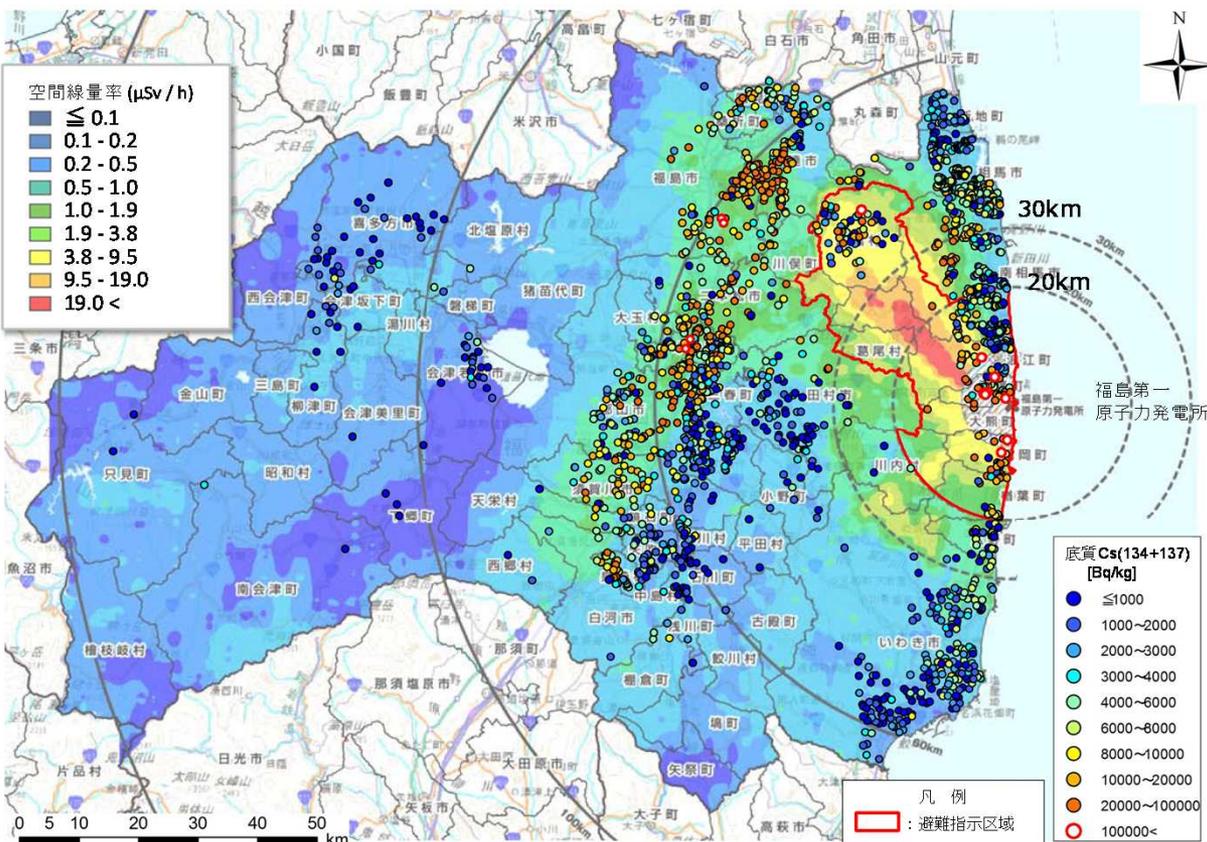
図2 河川・湖沼の底質中放射性Cs-137濃度と周辺土壌中放射性Cs-137濃度の関係

○ため池の水質

- Cs-137(避難指示区域外): 調査対象1575箇所のうち84箇所検出(検出下限値: 1 Bq/L)
- Cs-137(避難指示区域内): 調査対象245箇所のうち75箇所検出(検出下限値: 1 Bq/L)

○ため池の底質

- Cs-137(避難指示区域外): 検出下限値未満~250,000Bq/kg(検出下限値: 10Bq/kg)
- Cs-137(避難指示区域内): 47~270,000Bq/kg



ため池の底質濃度別分布図
(空間線量率との対比)

ため池等の放射性物質に関する実態と対策について
~2013年度ため池等汚染拡散防止対策実証事業の調査結果概要~

○沿岸(1~2km沖)の水質

- 福島県沿岸の15地点の表層(採水深0.5m)及び下層(採水深1~18.6m)の全てで、最近の調査(平成26年7月採取分)で不検出(検出下限値: 1 Bq/L)

○沿岸(1~2km沖)の底質

- 全ての地点で500Bq/kg以下(平成26年7月採取分)であり、直近河川(下流)の底質濃度に比べ、同程度か低い水準。
- 増減傾向については、ばらつきはあるものの、概ね減少傾向又は横ばい。

沿岸の底質のCs-137濃度の推移(福島県)

【図の種類】

- 右側黄地グラフ・・・沿岸底質中の放射性Cs-137の値
- 左側白地グラフ・・・直近河川(下流部)の底質中の放射性Cs-137の値

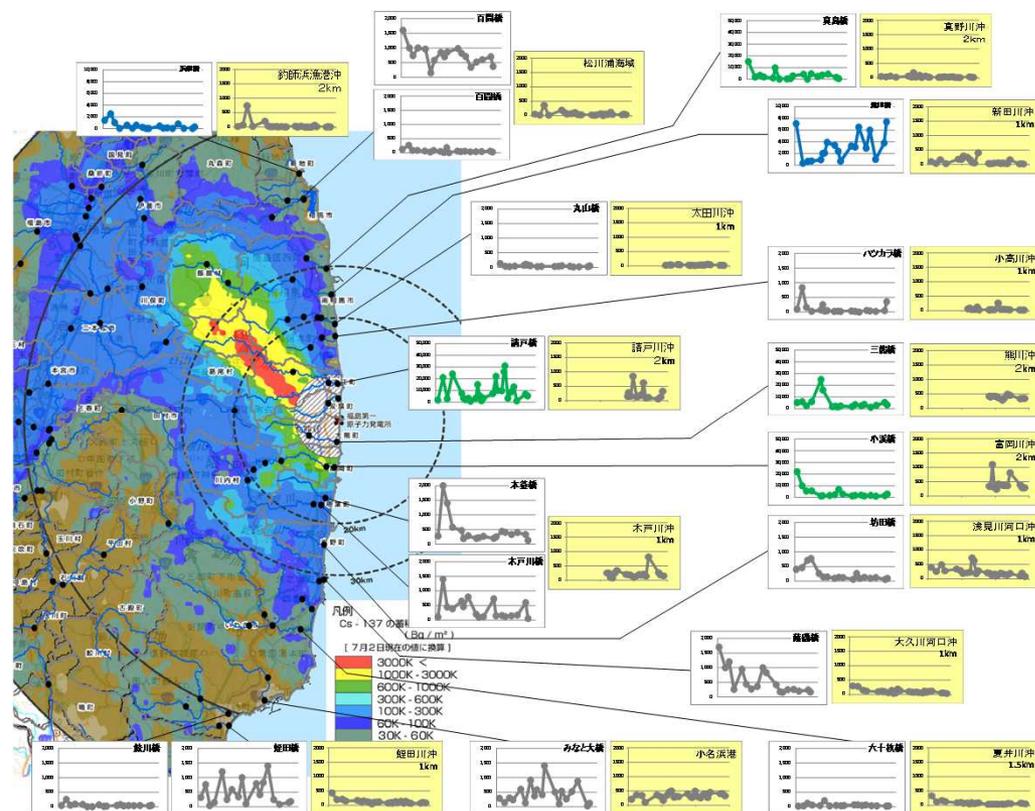
【縦軸のスケール】

- 緑色グラフ・・・0~ 50,000Bq-Cs/kg
- 青色グラフ・・・0~ 10,000Bq-Cs/kg
- 灰色グラフ・・・0~ 2,000Bq-Cs/kg

【横軸】

2011年9月~2014年7月

(データ) 環境省:東日本大震災の被災地における放射性物質関連の環境モニタリング調査:公共用水域



○水質の放射性Cs

- 河川や沿岸の水質については、概ね不検出。
- 湖沼等の水質については、福島第一原子力発電所周辺地域等の一部の地点を除き不検出。

○底質の放射性Cs

- 河川・湖沼等の底質については、福島第一原子力発電所周辺地域等の一部の地点を除き、数千Bq/kg以下。
- 沿岸域については、全て500Bq/kg以下。
- 経時的な変化としては、ばらつきはあるが、概ね横ばい又は減少傾向。
- 周辺土壌と底質の濃度とを比較した場合、河川については、概ね底質の放射性Cs濃度が周辺土壌の濃度より低い傾向。湖沼については、概ね同程度となる傾向。

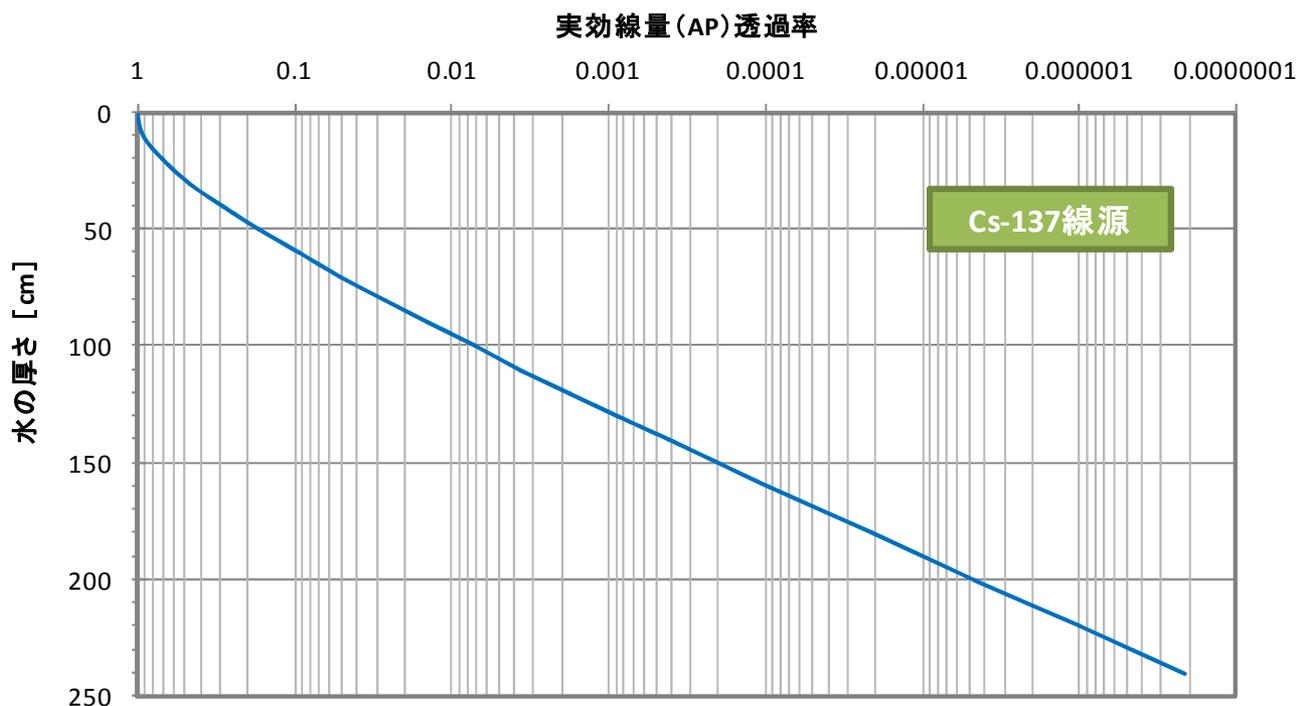
○周辺の空間線量率

- 浜通りの一部を除き、概ね1 μ Sv/h以下。
- 河川・湖沼等の周辺の空間線量率は周辺土壌の放射性Cs濃度と一定の相関がある。

○水による γ 線の遮へい効果(点線源に対する遮へい効果)

- 水の厚さが10cmの場合: 約10%の遮へい効果
- 水の厚さが30cmの場合: 約50%の遮へい効果
- 水の厚さが60cmの場合: 約90%の遮へい効果
- 水の厚さが1mの場合: 約99%の遮へい効果

* 1万Bq/kgの底質の場合、1mの水深の水面付近における空間線量は、水がないと $2.3\mu\text{Sv/h}$ であるが、水があることで、 $0.00074\mu\text{Sv/h}$ となる(面線源から放射線量で試算)



- 底質の放射性Cs濃度が高い場合でも、水による遮へい効果により底質からの放射線は遮へいされ、放射線被ばくに与える影響は極めて小さい。

○流域の土壌への沈着量とセシウム137の流出量

- 森林土壌から1年間に流出するCs-137の量は、流域の土壌への沈着量の0.02~0.26%程度。

流域	川俣町			筑波山	丸森町
	疣石山流域※1	石平山流域※1	高太石山流域※1	霞ヶ浦流域※2	宇多川上流※2
調査期間	44~45日間※3			21か月間	15か月間
土壌へのCs-137沈着量 (kBq/m ²)	544	298	916	13	170~230
Cs-137流出量※4 (kBq/m ²)	0.087	0.026	0.021	0.06	0.22~0.34
土壌へのCs-137沈着量 に対するCs-137流出率	0.016%	0.009%	0.002%	0.5%	0.12~0.15%



Cs-137の年間流出率※5	0.13%	0.07%	0.02%	0.26%	0.10~0.12%
----------------	-------	-------	-------	-------	------------

※1: (出典) JAEA:平成24年度放射能測定調査委託事業「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」成果報告書

※2: (出典) 国立環境研究所, 2012,2013

※3: 3流域の比較可能な平成24年10月1日~9・10日、10月22日~11月3日、11月29・30日~12月18・19日調査期間(44~45日間)を抽出し合計。

※4: ○疣石山流域, 石平山流域, 高太石山流域 : 渓流水における溶存態、SS(懸濁態物質)、粗大有機物(渓流水中の葉や枝等)のCs-137の合計

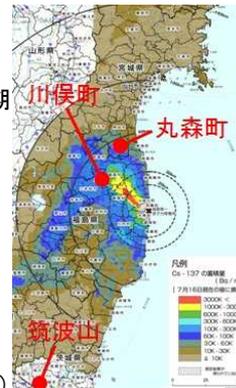
- ・溶存態: 平成24年8月、10月の平常時における溶存態放射性セシウム濃度を渓流水の流出量にかけた。

- ・SS: SSサンプラーの放射性セシウム濃度を濁度計の連続データと流量から得られたSSの流量にかけた。

- ・粗大有機物: 有機物の放射性セシウム濃度をトラップされた全量にかけた。

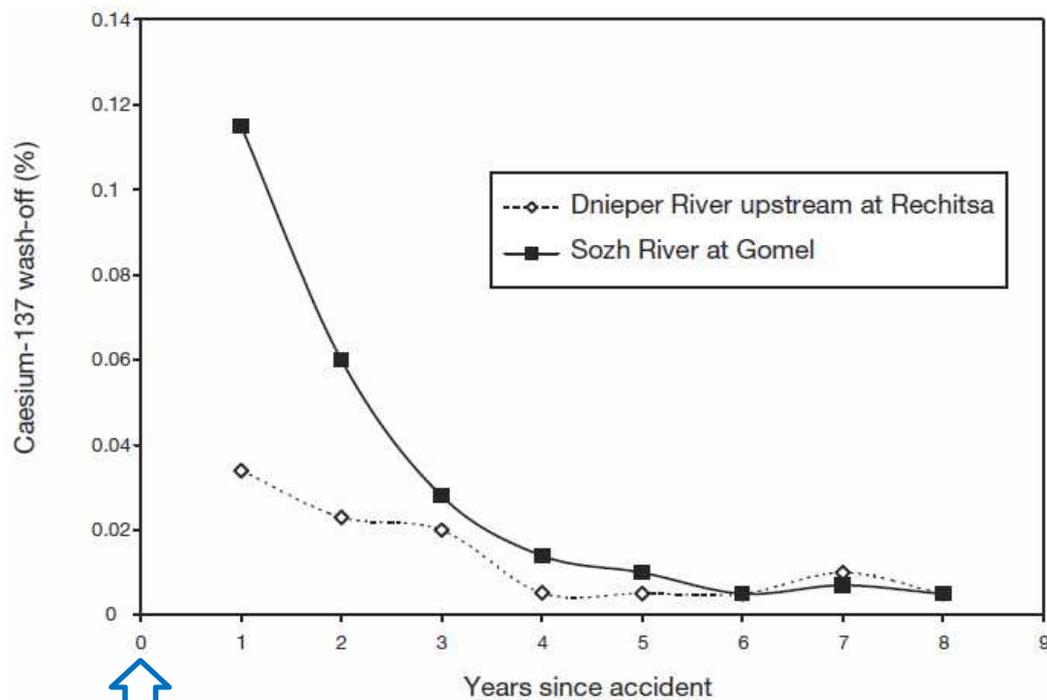
○霞ヶ浦流域, 宇多川上流 : SS由来のCs-137

※5: 上表のデータより、土壌への沈着量に対する流出率と調査期間から年間流出率に換算(環境省による試算)その際、放射性セシウムの自然崩壊や対象期間内の降雨の状況等は考慮していない。



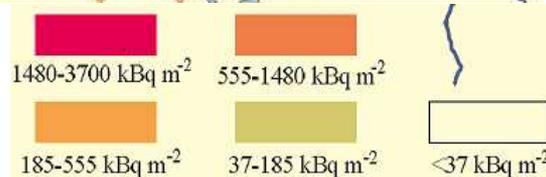
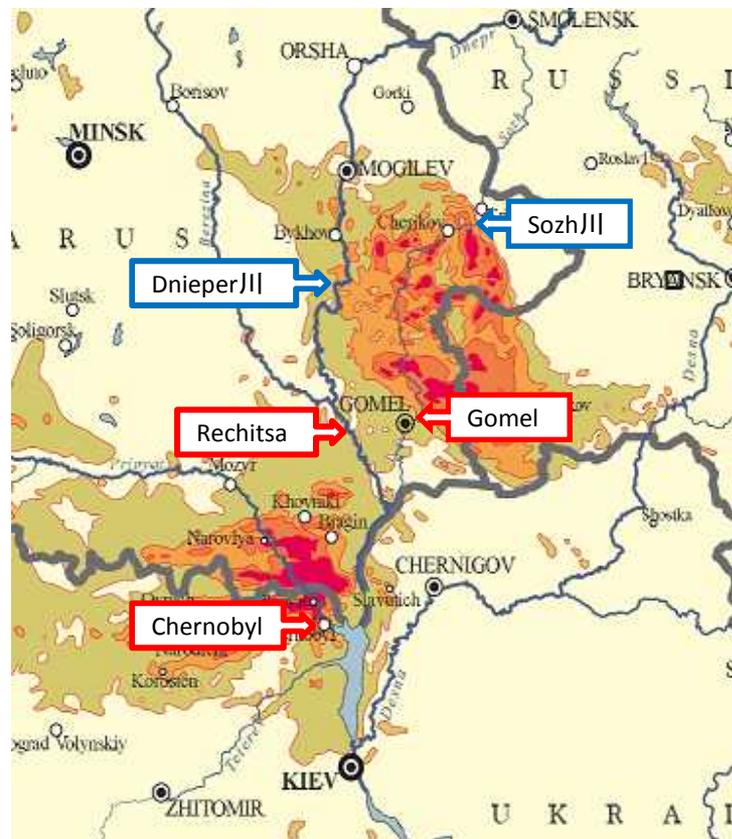
○ 土壤への沈着量とセシウム137の流出(ベラルーシにおけるモニタリング結果)

- ドニエプル川及びソジ川におけるCs-137の流出率は、事故後数年で安定。両川における、年間Cs-137の流出率は事故5年後以降は0.01%未満であった。



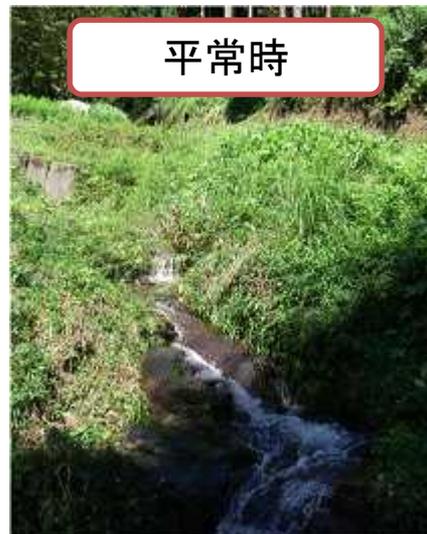
↑
チェルノブイリ
原子力発電所事故
(1986年)

ベラルーシの河川流域からのCs-137流出率の推移



○流域からのセシウム137の流出形態

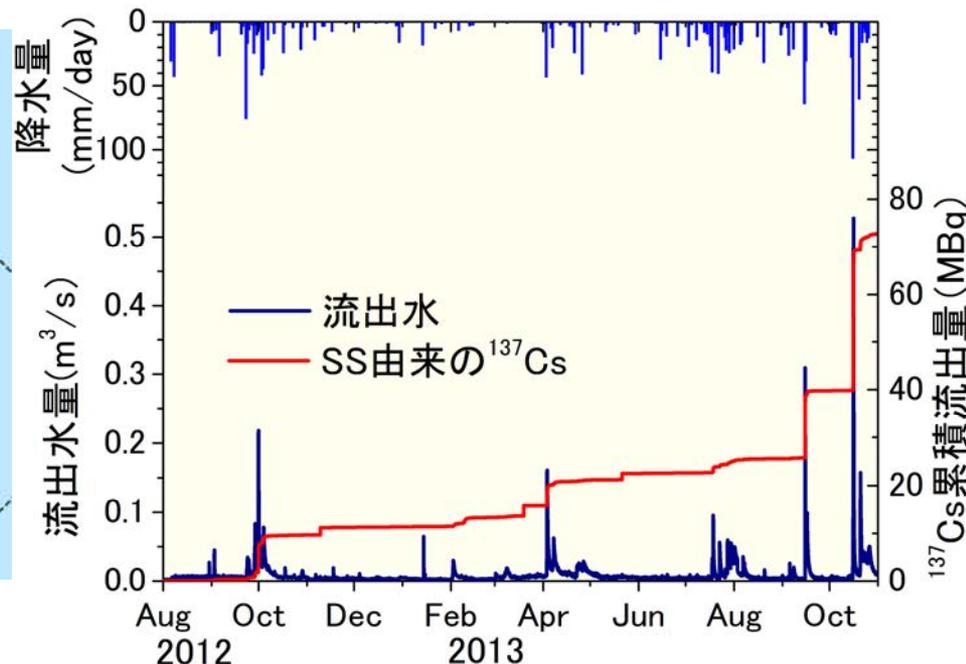
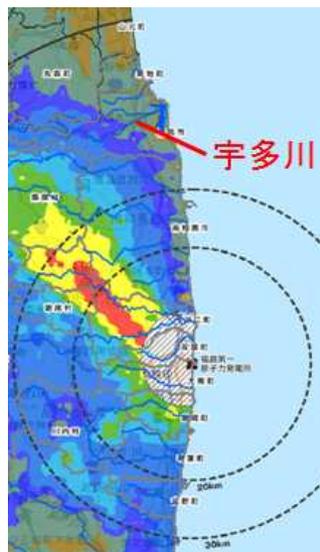
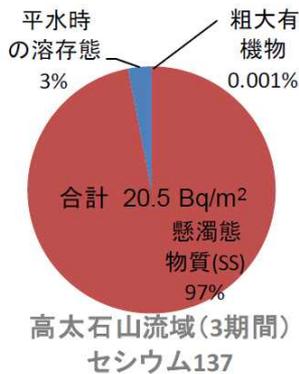
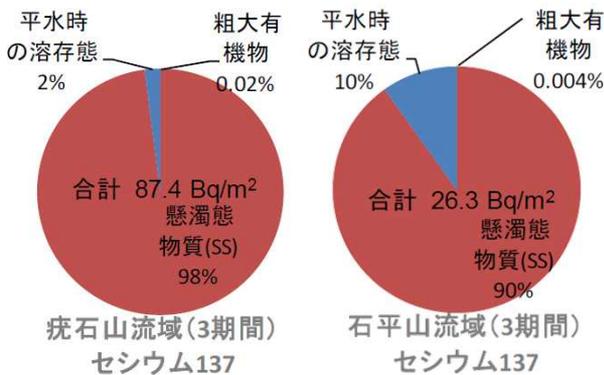
- 流域からの放射性Csの流出形態は、ほとんどがSS(懸濁態物質)である。
- 放射性Csの流出は、土砂動態や降雨条件(流出水量)に依存する。



平常時



降雨ピーク時

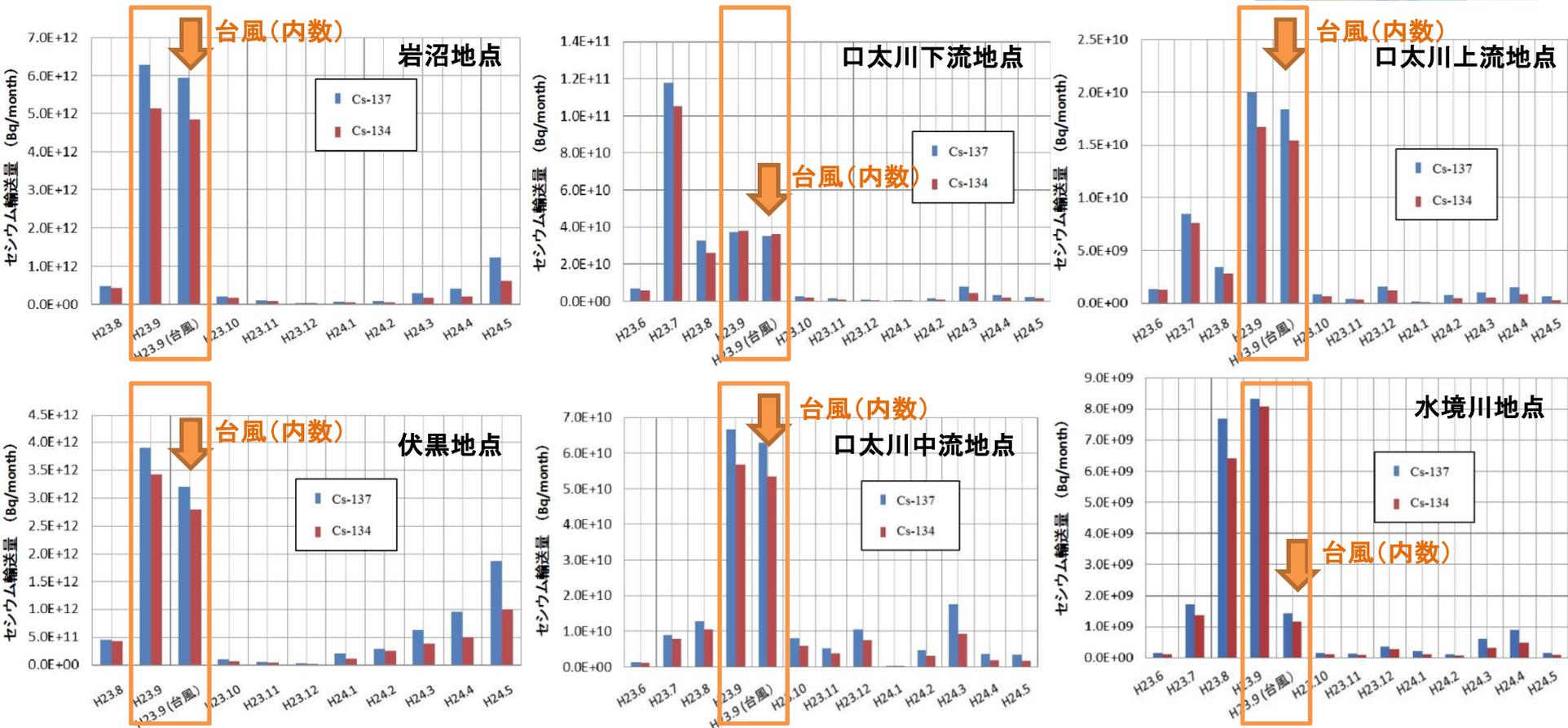
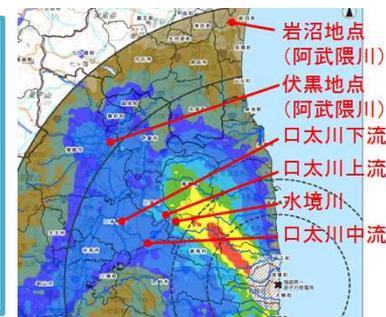


森林域からのCs-137の流出状況(宇多川上流)

流域からのCs-137の流出形態

○河川水等、水系による放射性物質の移行状況

- 放射性Csの各月の輸送量にはばらつきがあり、本調査期間中においては、平成23年9月の輸送量が大きい地点が多く、当該月の輸送量としては、台風時の輸送量が大きな割合を示す傾向であった(例えば、岩沼地点では、調査期間中の負荷量の6割以上が台風15号時期にもたらされた。)

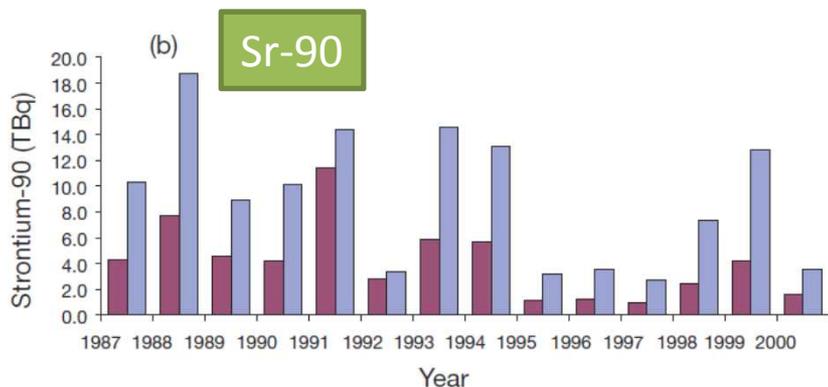
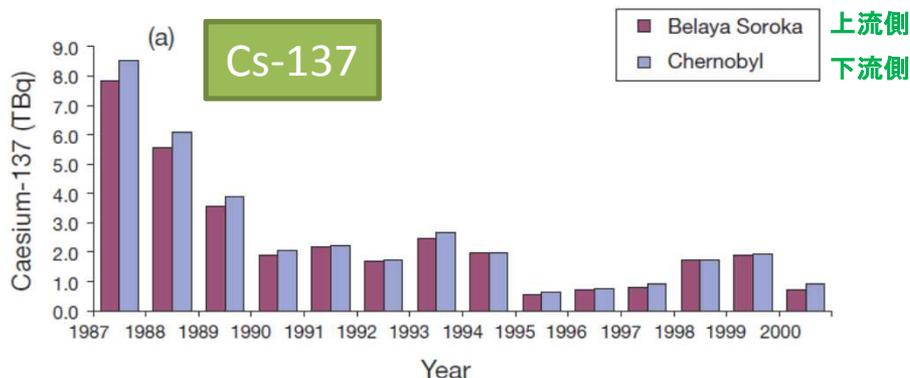


※台風の期間は平成23年9月19日～9月27日の8日間

毎月の放射性セシウム輸送量の時間変化

○森林や地表からのCs-137の河川への流入

- チェルノブイリ30km圏立入禁止区域(CEZ)の上流側と下流側を比較すると、Sr-90は下流側で増加するが、Cs-137は上流側と下流側でほとんど差がない。
⇒ Cs-137とSr-90は流出形態が異なり、流域のCs-137は河川水にほとんど影響を与えない。
(チェルノブイリは降水量が少ないために土壌の流出は少ないこと、また、Cs-137は土と吸着して溶出しにくく、Sr-90は水に溶出しやすいことが要因と考えられる。)
- Cs-137の流量は事故後10年で大幅に減少。



Pripjat川
(北西から南東に流下)

Belaya Soroka(上流側)

チェルノブイリ原子力発電所

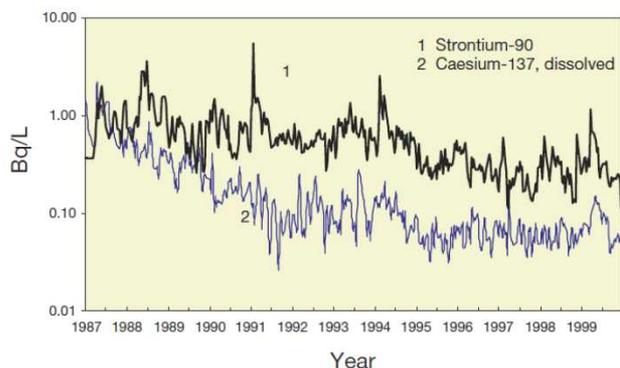
Chernobyl(下流側)

CEZ(30km圏立入禁止区域)

Pripjat川の放射性物質(溶存態+懸濁態)の流量の推移

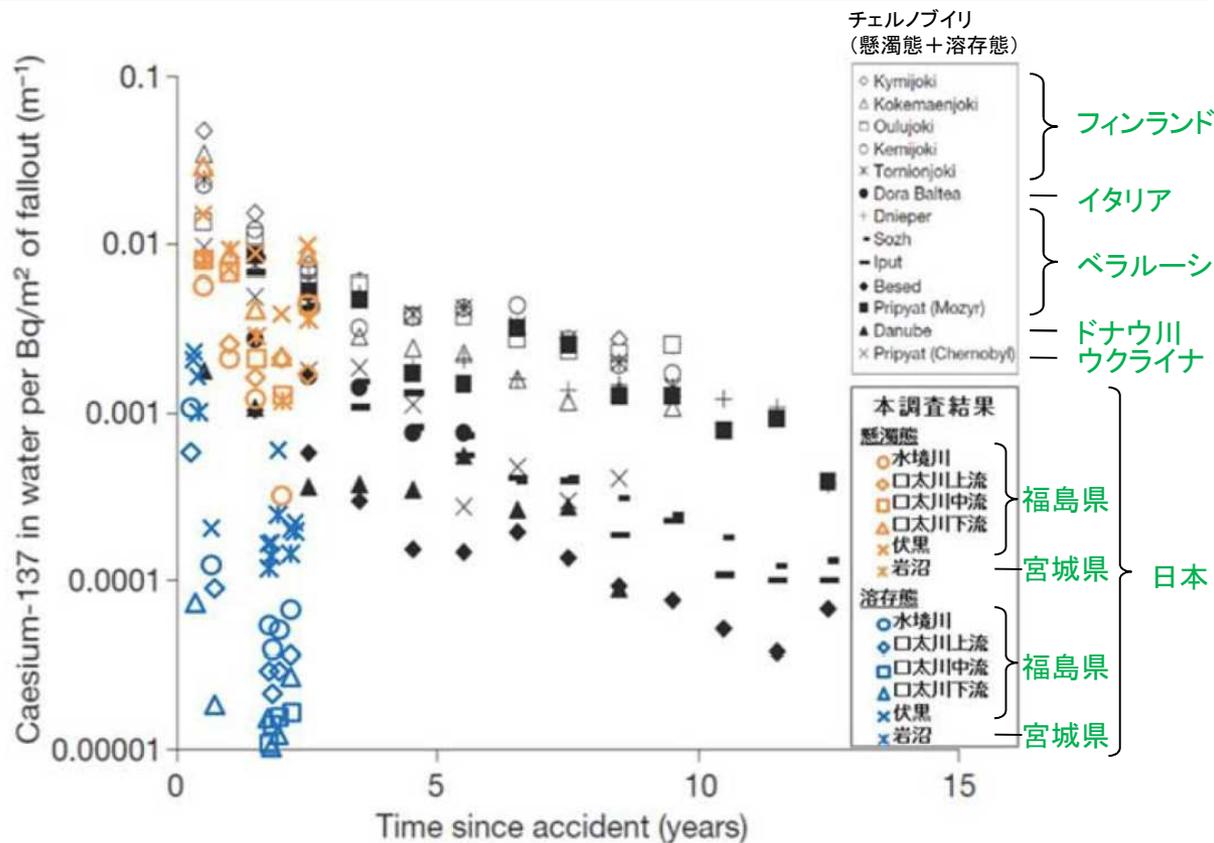
○放射性物質の沈着量あたりの河川水のCs-137濃度の推移

- 沈着量あたり河川水のCs-137濃度は、河川によって差があるが、長期的には減少傾向。
- 日本の河川もチェルノブイリの事例も減少傾向を示している。



チェルノブイリ近郊Pripyat川の放射能濃度の推移
(河川水の放射能濃度の月平均値の推移)

(IAEA Pub.1239)



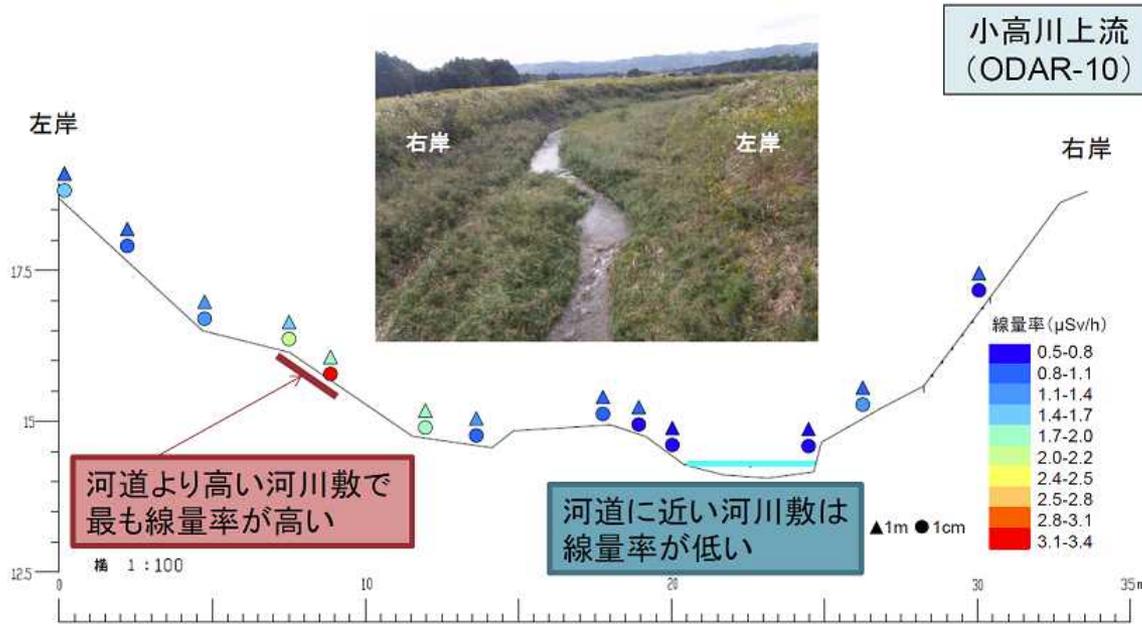
※地表の汚染の違いを考慮して、地面沈着量に対する水質の放射能濃度で評価

放射性物質の沈着量あたりの河川水Cs-137濃度の推移

(単位: $[Bq/m^3]/[Bq/m^2] = [1/m]$)

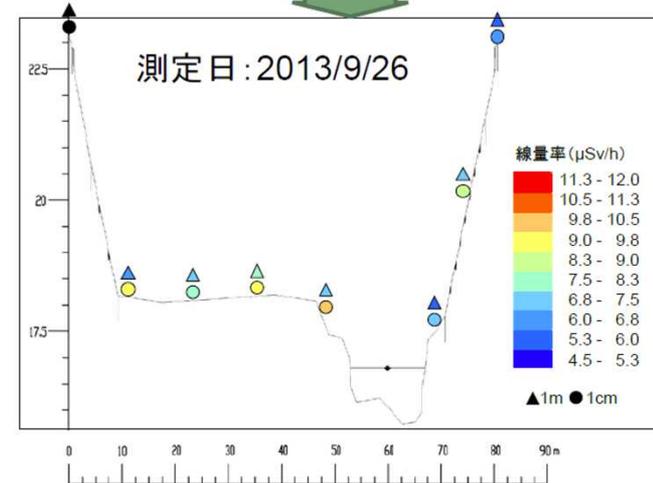
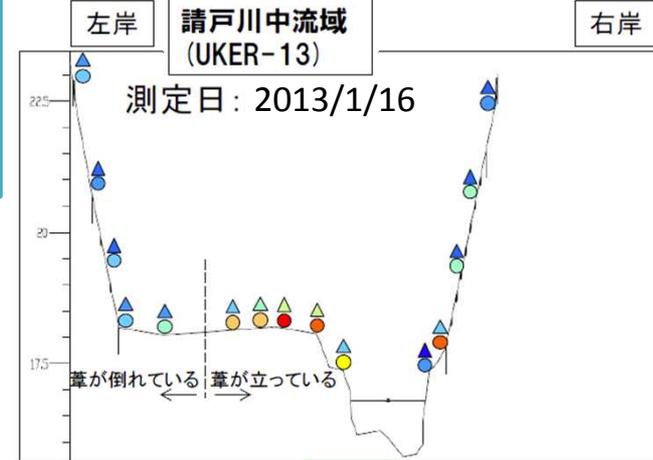
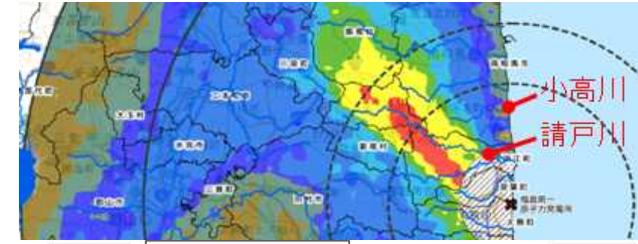
○河川敷における空間線量率の分布と推移

- 河道に近い河川敷よりも、河道より高い河川敷で空間線量率が高い地点が存在。
- 高水時においては、河川敷の植生がある場所に微細な粒子が捕捉される可能性がある。
- 請戸川の上流から下流における調査では、平成24年と比較して平成25年は全体には空間線量率は減少していた。



※線量率が高い場所は、高水時のみに水が到達する場所であった。

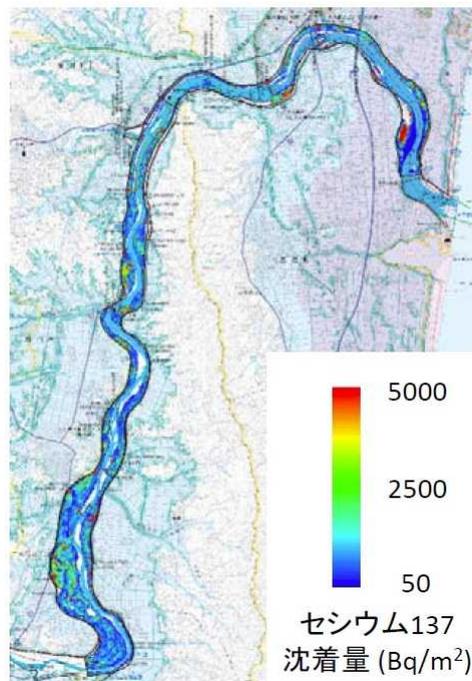
河川敷の線量分布測定結果



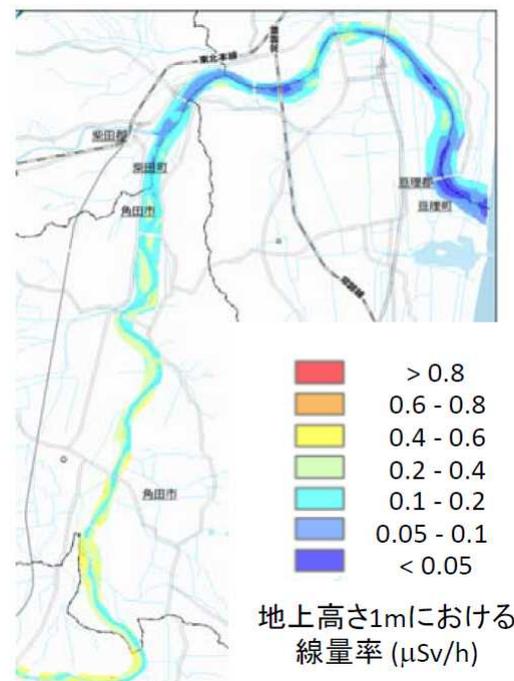
河川敷の空間線量率の経時変化

○モデル化(二次元解析)による土壌粒子の挙動解析

- 河川に流入した土砂(放射性Cs)のうち、0.62%が河川敷に堆積し、99%以上が海に流出。



Cs-137沈着量計算結果



無人ヘリによる観測空間線量率

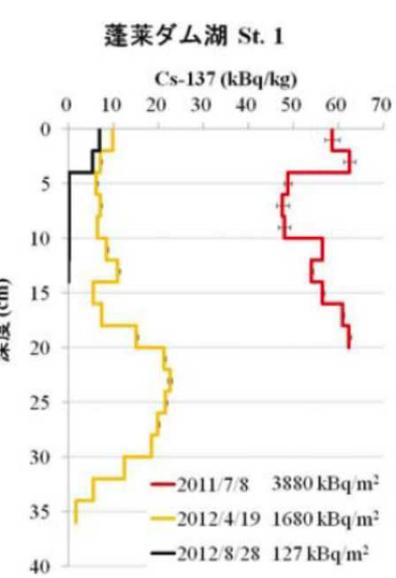
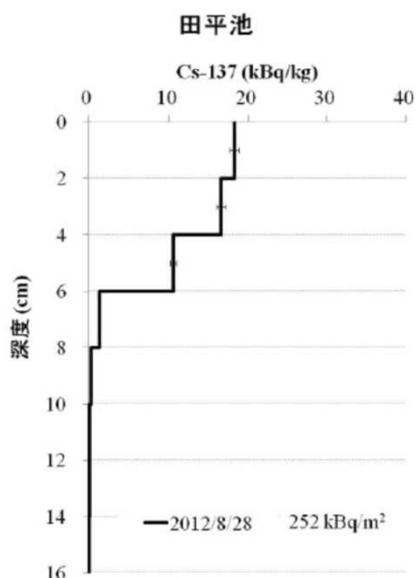
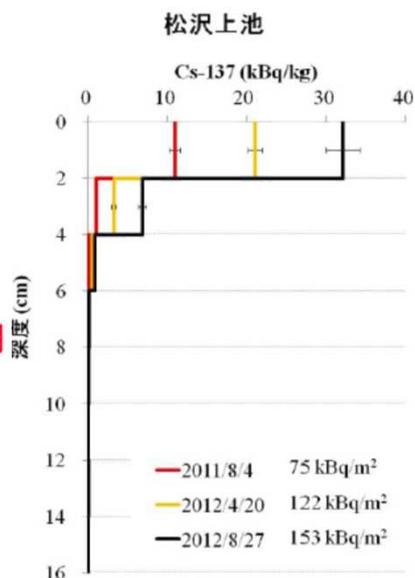
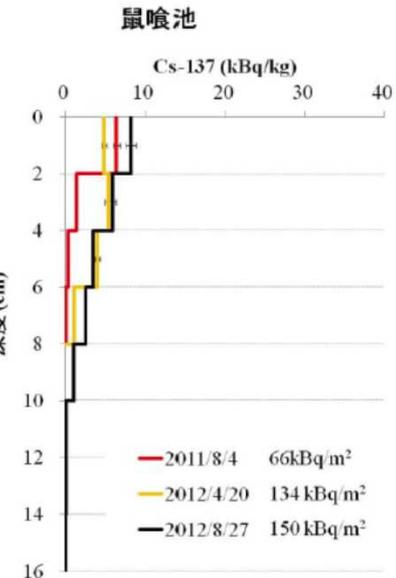
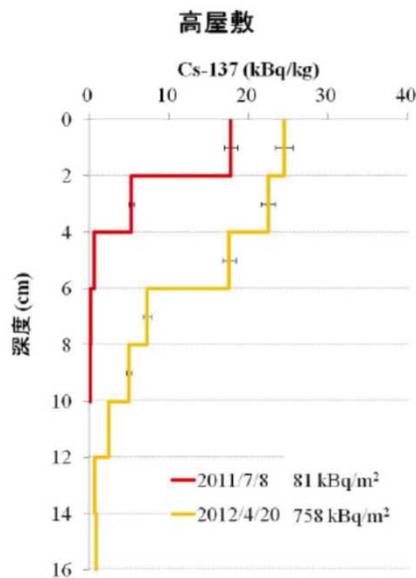
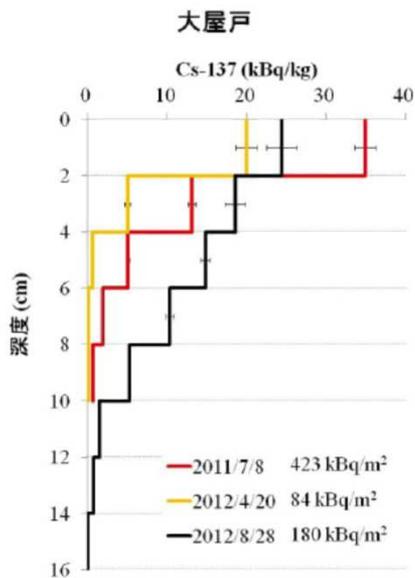
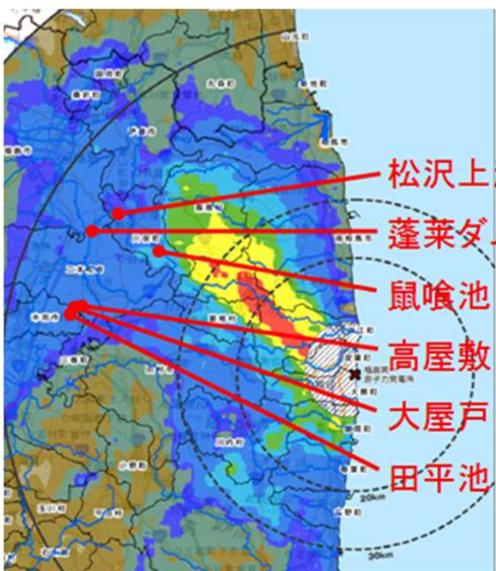
二次元解析*1による、ウォッシュロード(浮遊土砂)に伴う放射性セシウムの収支

流入土砂量	堆積土砂量	流入セシウム量	堆積セシウム量	堆積/流入
1.26 × 10 ⁶ m ³	774 m ³	1770 GBq	10.9 GBq	0.62 %

*1: 既存の二次元河川流動及び河床変動コードを用いて粒径が粘土画分である粒子の挙動を解析。
iRIC(河川解析プラットフォーム)中のRIC-NAYS2Dを改良。

○福島県内の湖沼及び貯水池における放射性物質の堆積状況調査

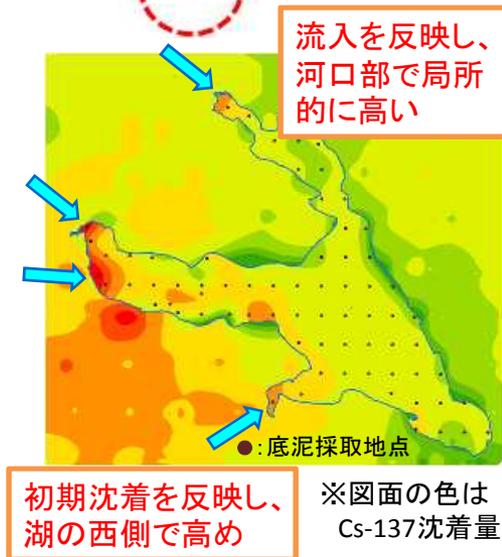
- 貯水池底泥中の放射性セシウムは、ほとんどが10 cm以浅に存在しており、また、その濃度は深度と共に減少。
- 蓬萊ダム湖のように、泥層の厚さが観測日により大きく変動し、堆積と流出を繰り返すと考えられる例がある。



湖沼等底質のCs-137の深度分布

○湖沼等底質の放射性Cs濃度の調査

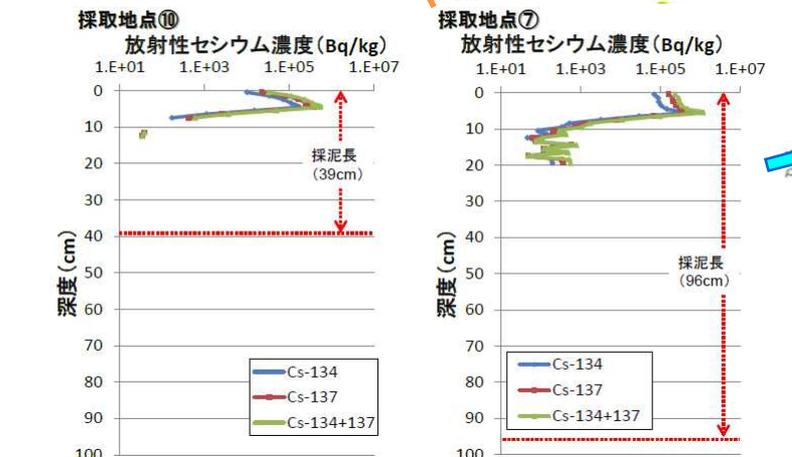
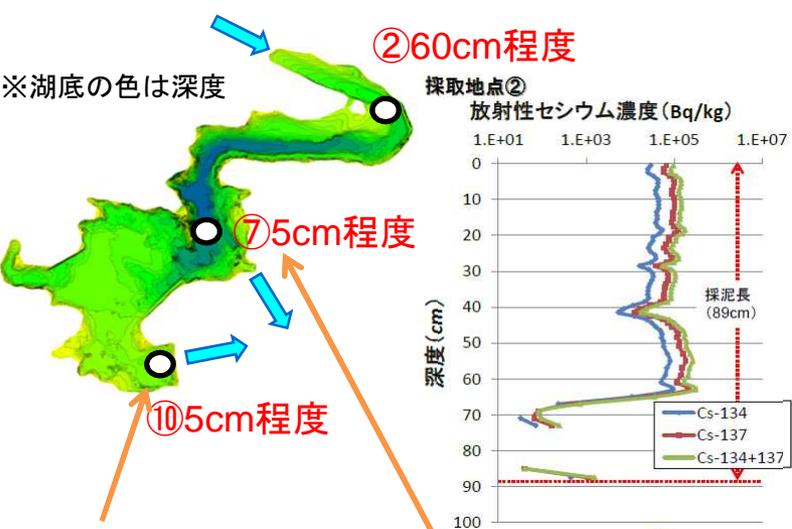
- 湖沼内の堆積状況の面的な分布について、流入河川の流速や流出の状況、周辺のCs沈着量など湖沼等の状況によって様々である。



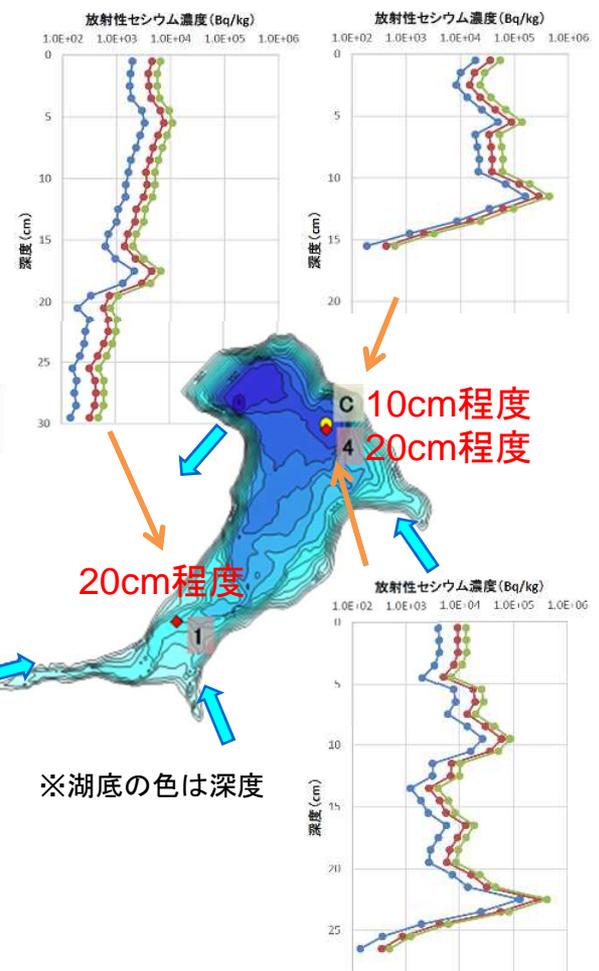
初期沈着を反映し、湖の西側で高め ※図面の色はCs-137沈着量

Cs-137蓄積分布図(霞ヶ浦)
(採取地点データから2次スプライン補間により作成)

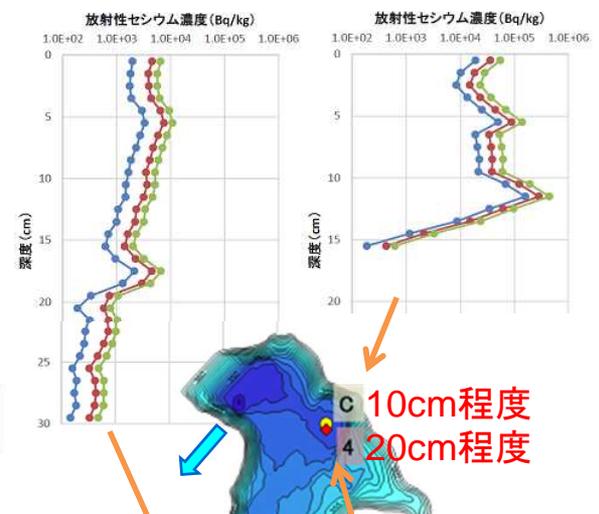
林 誠二(独)国立環境研究所 多媒体での放射性物質実態把握・動態解明グループ、「流域環境における放射性物質の動態」、放射能汚染ジョイントセミナー「生活環境から放射能汚染を考える」(H25.2)



湖沼底質のCs-137の深度分布(大柿ダム)
(JAEA, 2013)

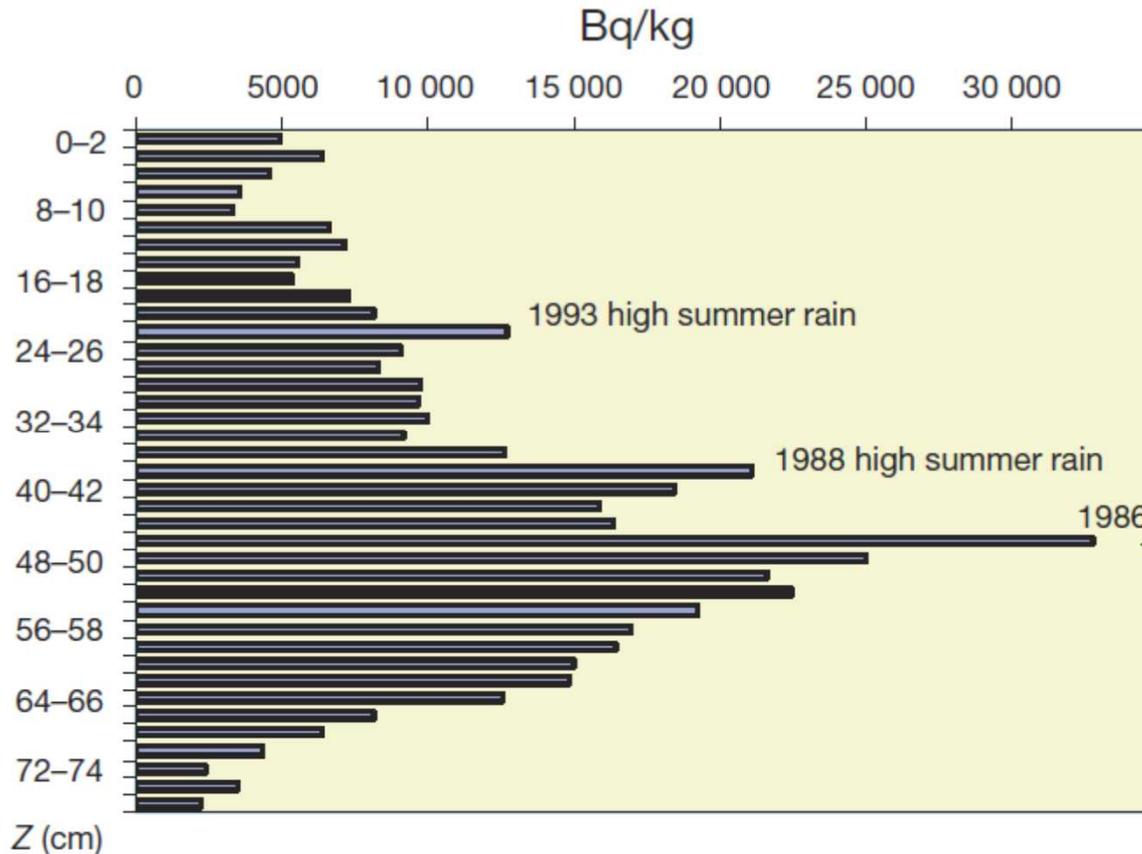


湖沼底質のCs-137の深度分布(萩ダム)
(JAEA: F-TRACE)



○チェルノブイリの事例(キエフ湖:事故12年後の底質Cs濃度の深度分布)

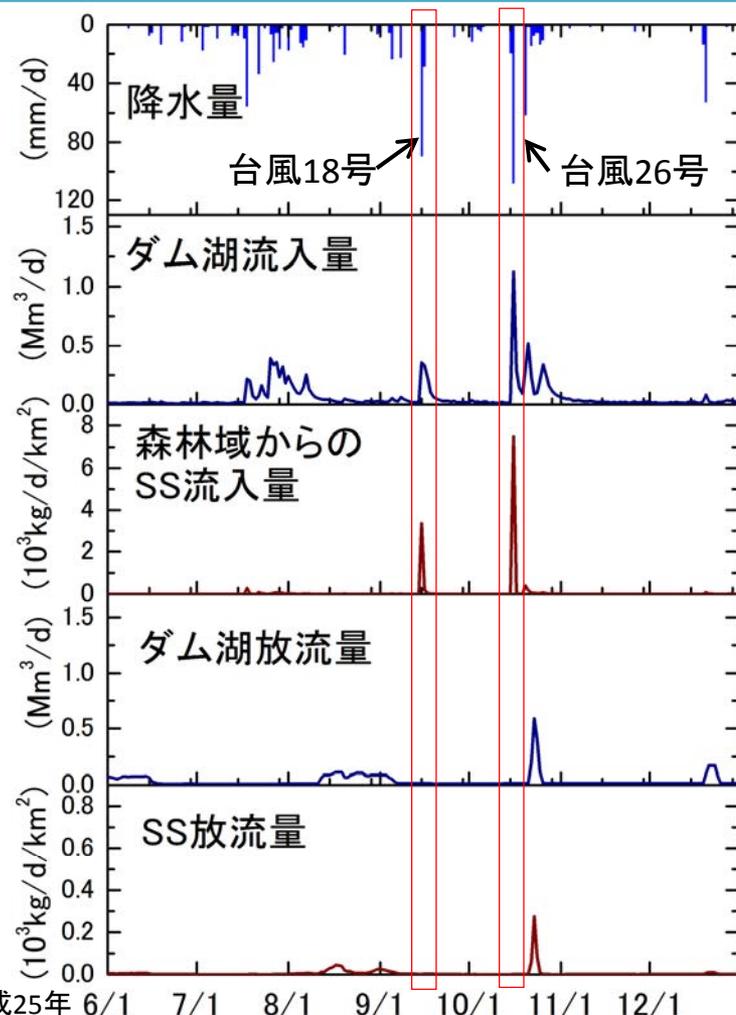
- キエフ貯水湖は堆積が早いため、堆積物の深度は堆積層の古さに対応する。
- 放射性Cs濃度が最も高い汚染層は、1998年の段階で数十cmの深さに埋もれている(湖底表面は新しい堆積物に埋もれて濃度が下がっている)。
- 1988年と1993年の層は、夏場の洪水による土壌流出の影響により、上下の層より放射性物質の濃度が高くなっている。



(1986年)
チェルノブイリ
原子力発電所事故

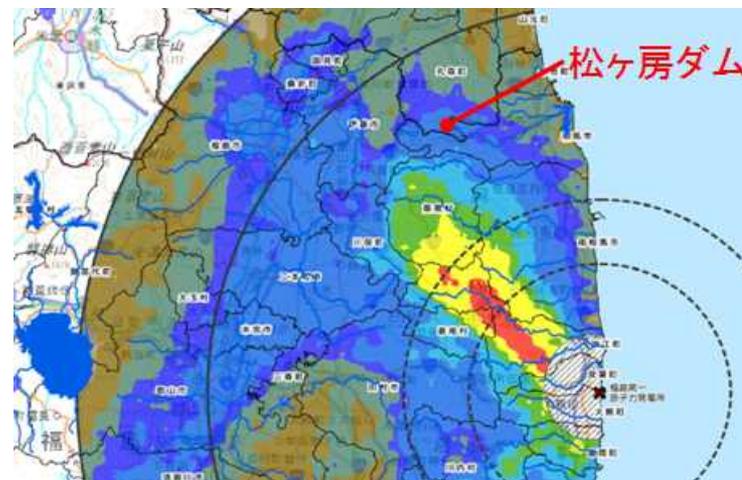
○松ヶ房ダムにおける放射性Csの流入・流出の推移

- 台風時に森林域からのSS流入量が増加。
- ダム湖への放射性Csの流入分に対する流出割合は10%であった。



ダム湖への放射性Csの流入分に対する流出割合:

$$\frac{\text{放流Cs137量 (放流SS量} \times \text{平均Cs137濃度)}}{\text{流入Cs137量 (流域沈着量} \times \text{推定流出率)}} = \frac{31 \times 10^3(\text{kg}) \times 30,000(\text{Bq/kg})}{300,000(\text{Bq/m}^2) \times 25.6 \times 10^6(\text{m}^2) \times 0.0011} \doteq 0.1$$



○ため池への放射性Csの流入

- 上流域が森林であるため池よりも、市街地であるため池(上流域の土地被覆の大半がアスファルトと建物)の方が、フォールアウト時の放射性Csの沈着量に対する蓄積量が多い傾向。
- 市街地のため池への放射性Csの流入は、フォールアウト直後の降雨により生じたと考えられる。

ため池の底泥に蓄積した放射性Cs濃度の比較

	森林ため池		市街地ため池
	○池	Y池	H池
平均水深[m]	3.00	1.27	2.00
池面積[m ²]	5,850	7,580	1,770
流域面積*[m ² × 100]	1,700	(16,000)	650
流域面積/池面積	29		37
底泥の平均Cs濃度** F _{sed} [kBq/m ²]	343	505	<u>1,680</u>
池に降下したCs濃度** F _{fall} [kBq/m ²]	399	603	350
F _{sed} /F _{fall}	0.86	0.84	<u>4.81</u>
水のCs濃度[Bq/L]	0.34	0.45	1.59

調査実施: 2012年12月、2013年2月

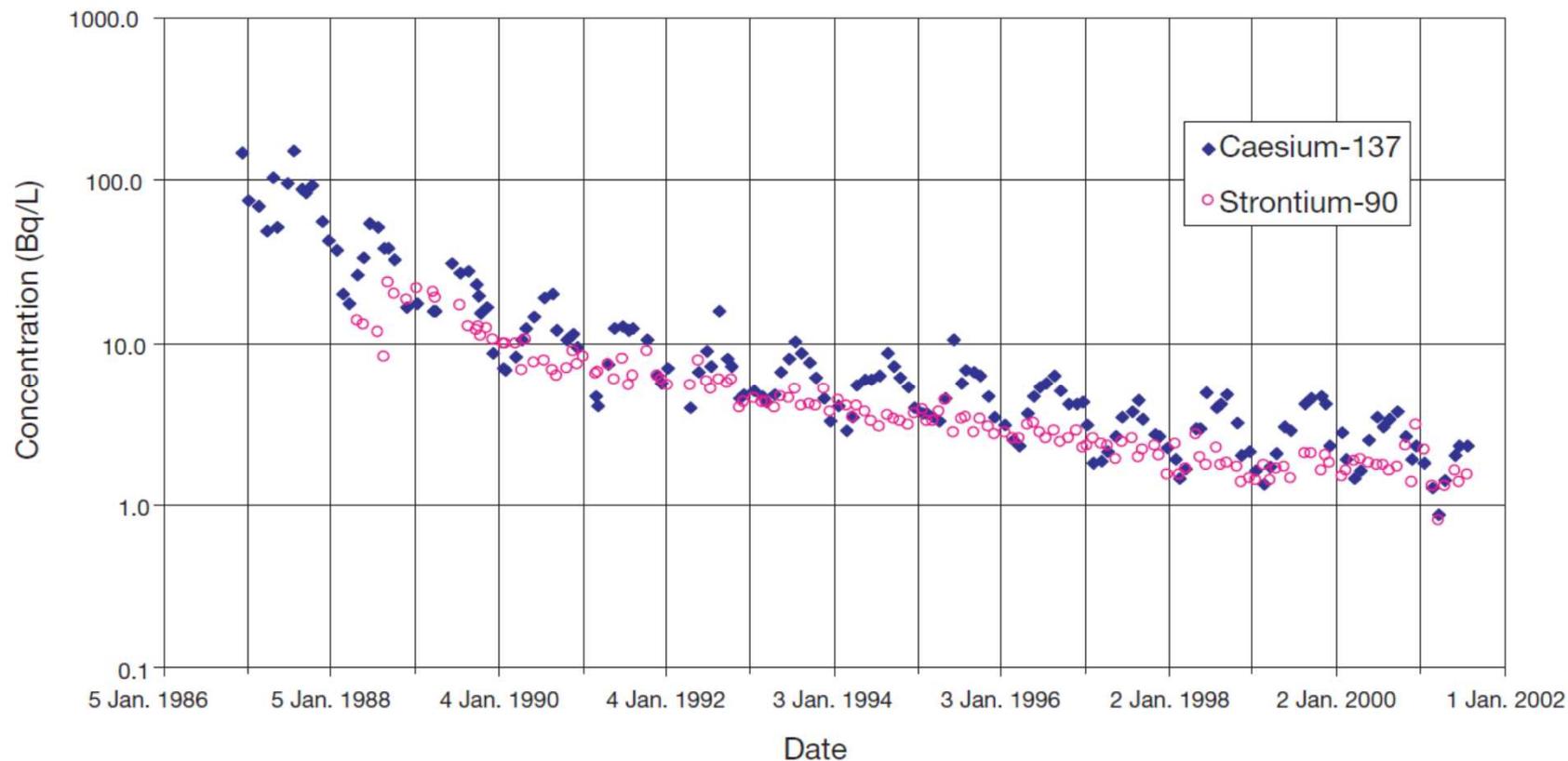
* 地形図から算定。Y池は地形が複雑急峻で流域面積を特定できないが、調査時の流量は○池より少なかった。

** 2011年3月時点の放射能に換算

○チェルノブイリ冷却池における湖水の放射性Cs濃度の調査

- 湖水の放射性Cs濃度は長期的に低減した。
- 夏期に放射性Cs濃度が上昇する(藻類と植物プランクトンの総量の変動との関連が示唆)。

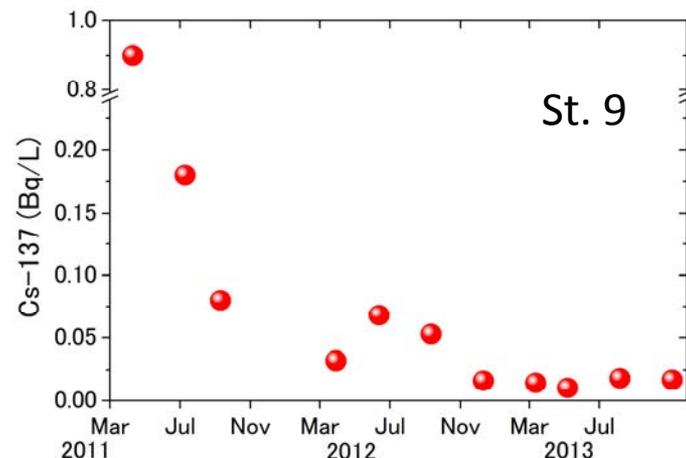
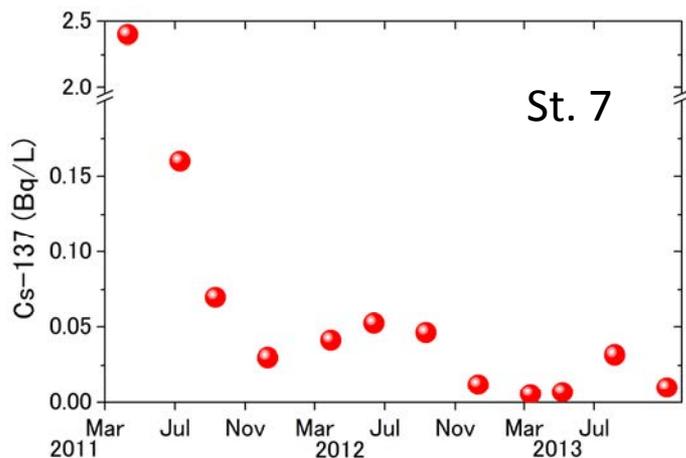
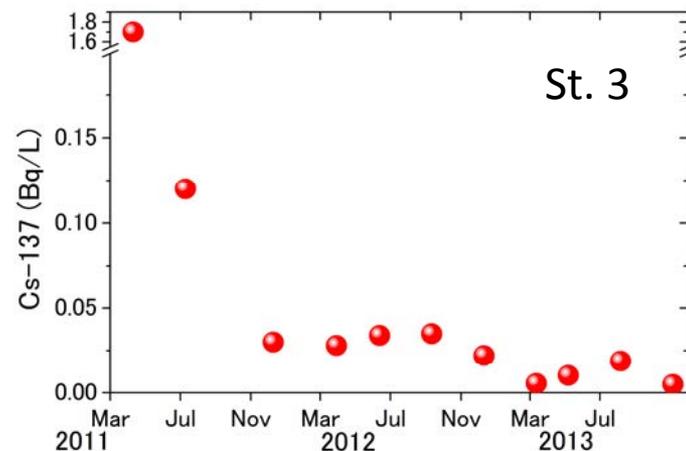
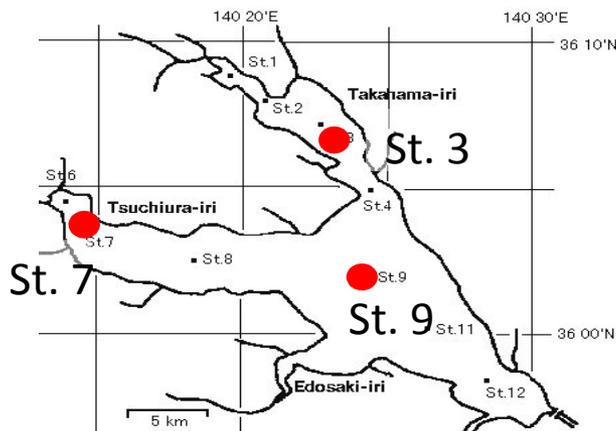
Monthly averaged ^{137}Cs ※ and ^{90}Sr activity concentrations in the water of the Chernobyl cooling pond



※: total (without separation for suspended and dissolved fractions) ^{137}Cs

○霞ヶ浦における湖水の放射性Cs濃度の調査

- 湖水の放射性Cs濃度は低減傾向にある。
- 夏期において湖水の溶存態Cs濃度の上昇(0.05Bq/L程度)が見られた(底泥に吸着しているCsを置換するNH₄⁺による影響の可能性)。



湖水の溶存態Cs-137の推移(霞ヶ浦)

○河川における動態

- 流域から河川へのCs-137の年間流出率は、流域の土壌へのCs-137沈着量の0.02～0.26%。
- Cs-137の流出形態は、ほとんどが懸濁態物質。Cs-137の流出は、土砂動態や降雨条件に依存し、台風通過時等の出水期に顕著に増加する傾向。
- 河川水のCs-137濃度は長期にわたり減少する傾向。
- 河川に流入したCs-137の多くは海に流出する。
- モデル化により河川の放射性物質の挙動を解析することが可能。

○湖沼における動態

- 湖沼に流入した放射性Csは、懸濁態物質とともに沈降する傾向。
- 底質の放射性Cs濃度は深度とともに減少するが、将来的には、新しい堆積物により、底質表面の濃度が減少する可能性も考えられる。
- 上流域がアスファルトで覆われた市街地のため池は上流が森林であるため池より、沈着量あたりの放射性Csの流入量が大きい傾向。
- 湖水の放射性Cs濃度は、長期的に減少傾向。

参考文献

- 環境省: 東日本大震災の被災地における放射性物質関連の環境モニタリング調査
- 農林水産省農村振興局・福島県農林水産部: ため池等の放射性物質に関する実態と対策について～2013年度ため池等汚染拡散防止対策実証事業の調査結果概要～(2014年7月)
- 日本原子力研究所: JAERI-Data/Code 2000-044 実効線量評価のための光子・中性子・ベータ線制動輻射線に対する遮へい計算定数(2001年1月)
- (独)日本原子力研究開発機構: 平成24年度放射能測定調査委託事業「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」成果報告書
- (独)日本原子力研究開発機構 福島技術本部 福島環境安全センター: 福島長期環境動態研究(F-TRACE), 福島県における放射性核種の環境中移動調査・研究(2013/03/22)
- 飯島 和毅: 福島長期環境動態研究－調査－, (独)日本原子力研究開発機構 福島技術本部 福島環境安全センター 平成25年度研究開発成果報告会 ～環境回復に向けての取り組み～(平成26年1月21日)
- (独)国立環境研究所(2012, 2013): 環境中の放射性物質の動態解明及び放射性物質に汚染された廃棄物等の効率的な処理処分等研究委託業務報告書(第1編 環境中の多媒体(大気・水・生物・生態系)での放射性物質等の実態把握・動態解明、モデリング、被ばく総量の評価・予測、低減手法等に関する調査研究)
- 塩沢昌: 放射性セシウムの土壌中の挙動、水稲への移行, 水系への流出放射能の土壌科学－森・田・畑から家庭菜園まで－, 日本学術協力財団(2013)
- IAEA Pub.1239: Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years experience(2006)
- IAEA Pub.1230: Radiological Conditions in the Dnieper River Basin(2006)
- IAEA: Technical Reports Series No.472, Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments(2010)