文献 ID：13-12-029

# 1．基本情報

| 区分 | 市街地 | 担当者名 | 古米弘明 |
|---|---|---|---|
| タイトル（英文） | Behavior of Radioactive Cesium in Wastewater Treatment Plants and Dissolution Test ofContaminated Sewage Sludge | | |
| タイトル（和文） | 下水処理場における放射性セシウムの挙動調査および溶出試験 | | |
| キーワード | Great East Japan Earthquake; Radioactive material; Wastewater treatment plant; Behavior research; Dissolution test | | |
| 著者 | Ikuo TSUSHIMA , Masashi OGOSHI ,Hiromasa YAMASHITA , Ichiro HARADA | | |
| 文献 | 水環境学会誌　Journal of Japan Society on Water Environment Vol.36, No.1, pp.23-28（2013） | | |

**（1）対象地域**

2011 年7－9月の晴天時に，合流式および分流式関東・東北地方の4 箇所の下水処理場を対象に），流入下水，初沈流入水，初沈流出水，活性汚泥，最終沈殿後水，生汚泥，余剰汚泥，濃縮汚泥，脱水汚泥，焼却灰，焼却炉等排ガス，返流水等を採取し，水質および放射性ヨウ素131，放射性セシウム134および137 の濃度測定を試みている。表1に調査対象の流入方式と調査日をまとめた。

表1　調査対象下水処理場の流入方式と調査日

| 下水処理場 | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|
| 流入方式 | 合流式 | 分流式（一部合流） | 分流式 | 分流式 |
| 調査日 | 7月4-5日<br>8月30-31日 | 7月4-5日<br>9月15-16日 | 7月 7-8 日 | 7 月 7-8 日 |

**（2）重要な図表**

合流式下水道である A 処理場処理区域において、2011 年 7 月 4 日 18 時 10 分から 18 時 30 分までの 20 分間に，約 5 mm の豪雨が観測された。本調査では，19 時の流入下水に含まれる放射能濃度を測定することにより，降雨が流入下水に与える影響について調査している。表 2 には A 処理場流入下水中（合流式）の放射線セシウム濃度及び SS を示した。降雨時の試料は，日平均値と比べ SS は約 5 倍に増加したのに対し，放射性セシウムは約 30 倍以上増加したことが確認された。なお，調査時の雨水混入率（（雨天時流入量－晴天時流入量）／雨天時流入量×100）は約 80%であった。また、下水道管渠内の堆積物等の放射性セシウムの状況について現状を把握するために，合計 19 地点（合流区域で 14 地点，分流区域で 5 地点）のマンホールの調査を 7 月に実施した。この結果，1 地点を除きマンホールには堆積物がないことが確認された。

表２　A処理場流入下水中の放射性セシウム濃度（Bq・kg$^{-1}$）及びSS（mg・L$^{-1}$）

| | 日平均流入水 | 雨天時流入水 |
|---|---|---|
| Cs-134 | 11 | 384 |
| Cs-137 | 13 | 407 |
| Cs 合計 | 24 | 791 |
| SS | 100 | 520 |

図 2 には A 下水処理場における各プロセスの放射性物質濃度および挙動を示した。また表 3 には A 下水処理場における SS および放射性セシウム濃度および除去率を示した。

流入下水には放射性セシウムが合計約 24 Bq ・kg $^{-1}$（浮遊性 ; 16.8 Bq ・kg $^{-1}$，溶存性 ; 7.5 Bq ・kg $^{-1}$），生物反応槽活性汚泥には約 200 Bq ・kg $^{-1}$（浮遊性 ; 186.2 Bq ・kg $^{-1}$，溶存性 ; 12.7 Bq ・kg $^{-1}$），濃縮汚泥には約 4,200 Bq ・kg $^{-1}$，脱水汚泥には約 82,000 Bq ・kg $^{-1}$ と汚泥処理過程で脱水されることにより高濃度になっていることが明らかになった。

表3の放射性セシウム濃度をSS濃度で除してSS中の放射性セシウム濃度を算定すると，ばらつきはあるものの全ての試料で同程度になることから，下水処理場に流入した放射性セシウムはSSと同様の挙動を示すことが示唆された。

表4には各処理場における晴天時の放射性セシウム濃度を示した。一部合流を含むB処理場では，流入下水中から放射性セシウムが検出された。一方、C処理場およびD処理場では流入下水中には放射性セシウムが検出されなかった。放射性セシウムの検出下限値は，C処理場では，浮遊性の放射性セシウムCs-134(0.4 )，Cs- 137（0.8），ろ液中の放射性セシウムCs- 134(0.4），Cs- 137(0.8 )，D 処理場では，浮遊性の放射性セシウムCs- 134(0.3)，Cs- 137(0.2)，ろ液中の放射性セシウムCs- 134（0.9 ），Cs- 137（0.9 ）（括弧内の数字は検出下限値。単位はBq ・kg $^{-1}$）であった。またすべての処理場で放射性ヨウ素131は検出されなかった。

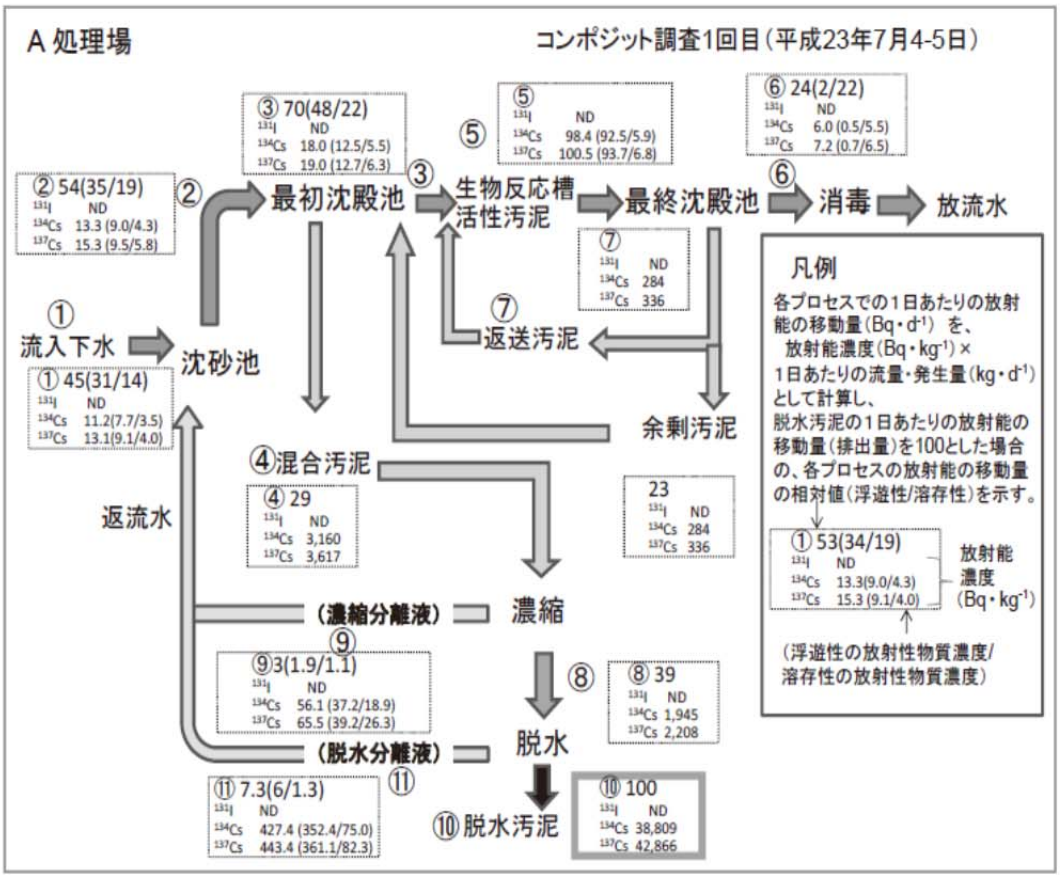


図2　A処理場における放射性物質の濃度と挙動（湿重量）

表3　A処理場の各工程におけるSS及び放射性セシウム濃度及び除去率（7月4－5日）

| | 濃度 | | | | | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | SS (mg・L$^{-1}$) | Cs(浮遊性) (Bq・kg$^{-1}$) | Cs(溶解性) (Bq・kg$^{-1}$) | Cs 計 (Bq・kg$^{-1}$) | Cs(浮遊性)/SS (Bq・mg$^{-1}$) | (図 2 中の番号) |
| 流入下水 | 100 | 17 | 8 | 25 | 0.17 | ① |
| 最初沈殿池流出水 | 124 | 25 | 12 | 37 | 0.20 | ③ |
| 生物反応槽活性汚泥 | 2,200 | 186 | 13 | 199 | 0.09 | ⑤ |
| 放流水 | 5 | 1 | 12 | 13 | 0.20 | ⑥ |
| 混合汚泥 | 28,000 | 6,700 | - | 6,700 | 0.24 | ④ |
| 濃縮汚泥 | 15,000 | 4,000 | - | 4,000 | 0.27 | ⑧ |
| 濃縮分離液 | 270 | 76 | 45 | 121 | 0.28 | ⑨ |
| 脱水汚泥 | 220,000 | 82,000 | - | 82,000 | 0.37 | ⑩ |
| 脱水分離液 | 2,500 | 714 | 157 | 871 | 0.29 | ⑪ |
| | 除去率 (%) | | | | | |
| 最初沈殿池除去率 | -24 | -50 | -57 | -52 | | (①-③)/① |
| 最終沈殿池除去率 | 96 | 95 | -2 | 64 | | (③-⑥)/③ |
| 水処理トータル | 95 | 93 | -60 | 46 | | (①-⑥)/① |
| 濃縮回収率 | 99 | 99 | - | 98 | | (④-⑨)/④ |
| 脱水固形物回収率 | 83 | 83 | - | 79 | | (⑧-⑪)/⑧ |

表4　各処理場における晴天時の放射性セシウム濃度（Bq･kg$^{-1}$）

| | | 流入下水 | 初沈流出水 | 生物反応槽活性汚泥 | 放流水 | 濃縮汚泥 | 脱水汚泥 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A処理場 | 7月 | 25 (17/8) | 37 (25/12) | 199 (186/13) | 13 (1/12) | 4,100 | 82,000 |
| | 8月 | 5 (2/3) | 23 (16/7) | 66 (57/7) | 8 (0/8) | 1,460 | 22,000 |
| B処理場 | 7月 | 23 (20/3) | 7 (6/1) | 135 | ND (< 2.4) | 930 | 10,000 |
| | 9月 | 2 (2/< 2.3) | 0.2 (0.2/< 1.6) | 4 (4/< 2.9) | ND (< 2.2) | 150 | 1,800 |
| C処理場 | 7月 | ND (< 2.2) | ND (< 2.7) | 4 (4/< 2.4) | ND (< 2.1) | 250 | 1,550 |
| D処理場 | 7月 | ND (< 2.4) | ND (< 2.1) | ND (< 2.1) | ND (< 2.1) | 60 | 540 |

*括弧内の数字は（浮遊性の放射性セシウム濃度/溶存性の放射性セシウム濃度）

表 5 には下水汚泥焼却灰，溶融スラグおよび排ガス中に含まれる放射性セシウム濃度を、表 6 には下水汚泥焼却灰および溶融スラグからの放射性セシウムの溶出試験結果をそれぞれ示した。

表 5 から、いずれの処理場においても排気中の放射性セシウム濃度は不検出であり，ダイオキシン対策等をしている焼却炉であれば，排ガス中の放射性セシウムはほぼ全量が電気集塵機やバグフィルターで回収されると考えられる。

表 6 から、計 12 検体のうち 9 検体では検出下限値以下であった。残りの 3 検体についても溶出率は 0.5－2.7%であり，溶出液中の放射性セシウムは極めて低濃度であった。このことから，下水汚泥焼却灰および溶融スラグは水と接触しても放射性セシウムが溶出しにくいことが示唆された。

表5　焼却灰，溶融スラグおよび排ガス中に含まれる放射性セシウム濃度

| 炉の形式 | 除塵装置 | 焼却灰あるいは溶融スラグに含まれる放射性セシウム濃度（Bq･kg$^{-1}$） | | 排気中に含まれる放射性セシウム濃度（Bq･m$^{-3}$） | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Cs-134 | Cs-137 | Cs-134 | Cs-137 |
| 流動床焼却炉① | バグフィルター | 15,000 | 17,000 | ND (< 0.06) | ND (< 0.06) |
| 流動床焼却炉② | 電気集塵機 | 7,100 | 7,700 | ND (< 0.09) | ND (< 0.11) |
| 旋回式溶融炉① | バグフィルター | 12,000 | 14,000 | ND (< 0.40) | ND (< 0.45) |

（）内は検出下限値

表6　下水汚泥焼却灰および溶融スラグからの放射性セシウムの溶出試験結果

| No | 試料 | 排除方式 | 焼却炉タイプ | Cs-134＋Cs-137 (Bq·kg$^{-1}$) | | | pH | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 溶出前試料 | 溶出液 | 溶出率（%） | 溶出前 | 溶出液 |
| 1 | 焼却灰 | 分流 | 気泡塔式流動床炉 | 7,720 | 21 | 2.7 | 5.9 | 6.0 |
| 2 | 焼却灰 | 分流<br>一部合流 | 循環式流動床炉 | 23,100 | 11 | 0.5 | 6.1 | 6.0 |
| 3 | 焼却灰 | 合流<br>一部分流 | 気泡塔式流動床炉 | 7,540 | 4 | 0.6 | 5.9 | 6.7 |
| 4 | 焼却灰 | 分流<br>一部合流 | 循環式流動床炉 | 5,810 | ND<br>(< 13) | - | 5.8 | 6.5 |
| 5 | 焼却灰 | 分流<br>一部合流 | 循環式流動床炉 | 3,060 | ND<br>(< 13) | - | 6.3 | 6.5 |
| 6 | 焼却灰 | 合流<br>一部分流 | 気泡塔式流動床炉 | 7,570 | ND<br>(< 7) | - | 6.2 | 6.7 |
| 7 | 焼却灰 | 合流<br>一部分流 | 乾燥段付流動床炉 | 9,470 | ND<br>(< 7) | - | 5.9 | 6.6 |
| 8 | 焼却灰 | 分流 | 多段炉 | 2,890 | ND<br>(< 12) | - | 6.2 | 6.2 |
| 9 | 焼却灰 | 分流 | 多段炉 | 2,790 | ND<br>(< 7) | - | 6.3 | 7.1 |
| 10 | 焼却灰 | 分流<br>一部合流 | ストーカ炉 | 8,690 | ND<br>(< 7) | - | 5.9 | 6.9 |
| 11 | 溶融スラグ<br>（空冷） | 分流 | スラグバス式 | 38 | ND<br>(< 13) | - | 6.2 | 7.0 |
| 12 | 溶融スラグ<br>（水冷） | 分流<br>一部合流 | 旋回溶融炉 | 17,800 | ND<br>(< 7) | - | 6.1 | 6.0 |

## 2. 提言につながる情報

### （1）モニタリングへの活用

特になし。

### （2）流出挙動・経路

放射性セシウムは懸濁物質に吸着し、SS と同様の挙動をとることが示された。一方で放射性ヨウ素は検出されなかった。放射性ヨウ素は雨水により流出せずに市街地に蓄積されている、すでに環境水中に移行している、もともと市街地には堆積していない、などが考えられるが、今回のデータからでは詳細な知見は得られなかった。

市街地に堆積した放射性セシウムは雨水により流出し、下水道に流入する。その後合流式下水道を経て下水処理施設に流入、あるいは分流式下水道雨水管路を経て河川等に排出されると考えられる。これは表 2 で合流式を採用している A 処理場の降雨後の放射線物質濃度が著しく増加していること、表 4 から、分流式を採用している処理場では合流式に比べて数値が小さい、あるいは不検出となっていることから明らかである。表 4 は晴天時の流入下水中の値を示しているが、合流式下水道では放射線物質が確認されている（分流式では不検出）。本文中に管路内堆積物から放射性セシウムの継続的な供給はないとしているが、管路内堆積物の再浮遊の影響が少なからずあると考えられる。

下水処理場内部では、表面流出水に由来する浮遊性の放射性セシウムが溶存性の放射性セシウムと比較して大部分を占めていた。浮遊性の放射性セシウムのほとんどが汚泥中に濃縮し蓄積されている。一方で溶存性の放射性セシウムは処理過程では大きく変化せずに放流されている。結果として浮遊性、溶存性ともに事業場及び最終処分場の周辺の公共の水域の水中濃度限度（$^{134}$Cs：60 Bq・L$^{-1}$，$^{137}$Cs：90 Bq・L$^{-1}$）を大幅に下回っている。また濃縮された下水汚泥は脱水、焼却により減容されるが、焼却に伴う放射性セシウムの飛散はバグフィルターや電気集塵機を備えていれば、不検出レベルまで抑えられることが確認できた。これらの措置をとっていない処理場の場合については特に言及はなかった。また、焼却灰や溶融スラグ水と接触しても溶出しないことが示唆された。

以上から、市街地から下水処理場に流入した放射性セシウムは処理場内で大部分が捕捉される。濃縮汚泥、その焼却灰、溶融スラグ、排気ガスの管理を適切に行えば処理場から環境水中への放射性セシウムの移行は防げると考えられる。一方で分流式下水道雨水管路や合流式下水道越流水からの寄与は考えられる。

### （3）除染の際の留意点

特になし。

### （4）担当者のコメント

内容については下水道における放射性物質対策に関する検討会が掲載した中間とりまとめの 1 章と 3 章と同様だった。今回の調査から下水処理施設は市街地から流入した放射性セシウムについては環境中へ拡散の抑制に役割を果たしているといえる。一方で合流式下水道越流水や分流式下水道雨水管路からの放流水の影響については今後調査すべき項目かもしれない。これに関連して合流管路内の管路内堆積物の影響についても濃縮され高濃度の放射性セシウムが流出している可能性があるため、より精査する必要が考えられる。