

土壌・地下水汚染対策の基礎

中杉 修身

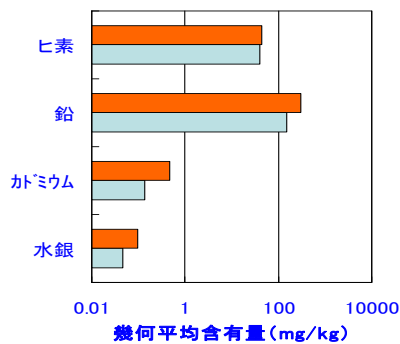
1

土壌・地下水汚染問題のこれまでの経緯

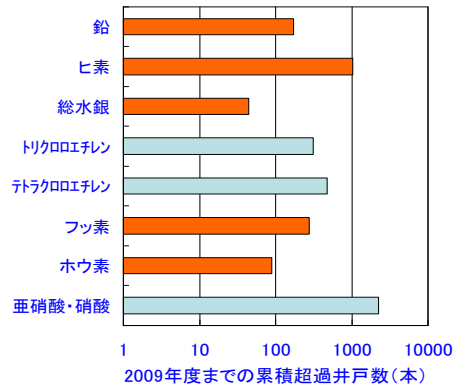
1877年頃	渡良瀬川流域の銅などによる土壌汚染が国会で取り上げられる。
1968年	イタイイタイ病の原因がカドミウムであることが判明。
1970年	「農用地土壌汚染防止法」の成立。東京都で六価クロム鉱滓埋立による土壌汚染が表面化。
1981年	東京都が公有地取得の土壌汚染処理基準を設定。国の試験場跡地等で土壌汚染が次々と発覚。
1982年	有機塩素化合物による全国的な地下水汚染が判明。
1986年	「市街地土壌汚染暫定対策指針」を策定。
1989年	有害物質を含む排水の地下浸透の禁止（水質汚濁防止法の改正）。
1990年	「市街地土壌を処理する際の処理目標」を設定。
1991年	土壌環境基準（重金属等10項目と農用地基準）を設定。
1992年	「国有地の土壌汚染対策指針」を策定。
1994年	土壌環境基準15項目を追加、2項目を強化。「重金属等とVOCの調査・対策指針」を策定。
1996年	地下水汚染の浄化措置命令（水質汚濁防止法の改正）。
1997年	地下水環境基準を設定。最終処分場の管理を強化（廃棄物処理法の改正）。
1998年	一般廃棄物焼却施設周辺土壌から高濃度ダイオキシン類を検出。
1999年	地下水環境基準3項目を追加。居住地土壌のダイオキシン類暫定ガイドライン値を設定。ダイオキシン類対策特別措置法の成立。「土壌・地下水汚染調査・対策指針運用基準」を策定。
2000年	ダイオキシン類土壌環境基準と対策要件を設定。土壌環境基準2項目を追加。廃棄物最終処分場の管理を強化。
2001年	土壌の直接摂取にかかる要措置レベルを算定。
2002年	土壌汚染対策法の制定。
2009年	土壌汚染対策法の改正。地下水環境基準3項目の追加。
2010年	農用地土壌環境基準の見直し（カドミウム）。

2

土壌・地下水汚染は過去の遺産と 自然由来が中心である



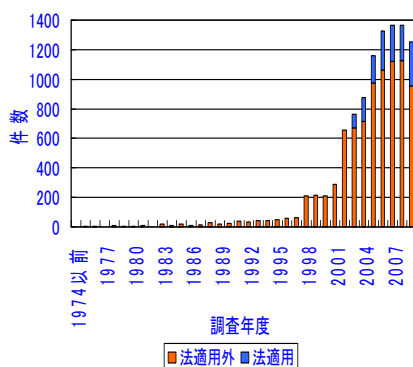
表層土壌中の汚染濃度
排ガスや廃棄物等の対策によってバックグラウンドの表層土壌中の重金属等の含有量は低下している。



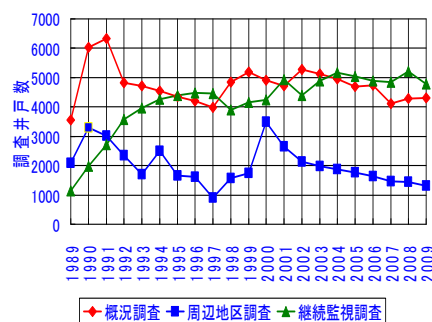
自然由来の重金属等の地下水汚染
周辺に発生源がないことが判定根拠とした判定が多いが、地下水中のヒ素、フッ素、ホウ素、鉛などの地下水汚染の多くは、自然由来と判定されている。

3

土壌は事業者が自主的に、地下水は 行政が計画的に監視している



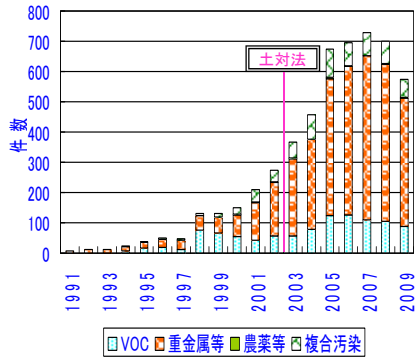
土壌汚染の調査
土壌汚染は事業者の自主調査や地方自治体の条例・要綱に基づく調査で把握されてきた。土壌汚染対策法では一定条件下での調査を義務づけたが、法に基づく調査による判明は一部にとどまってきた。



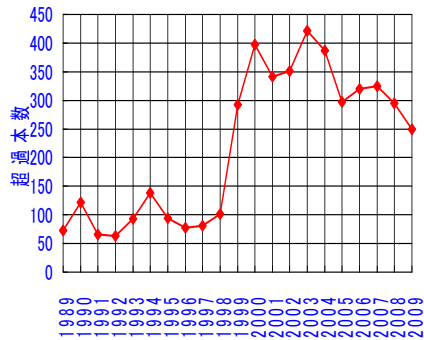
地下水汚染の調査
地下水汚染状況は、地域の汚染実態を把握する概況調査、汚染の広がりを把握する汚染井戸周辺地区調査と汚染の推移を監視する継続監視調査の3本立てで地方自治体が把握している。

4

土壌や地下水の汚染が次々と 明らかになっている



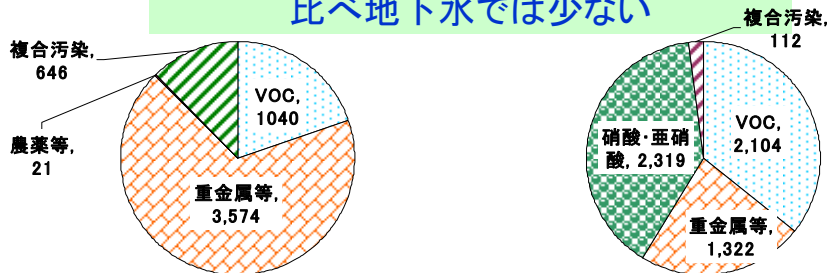
土壌汚染超過事例判明件数
土壌汚染判明件数は年々増えてきたが、土壌汚染対策法の施行によって、土壌汚染の調査・判明件数の増加が一層加速された。



地下水概況調査の超過井戸本数
地下水概況調査では毎年多くの基準超過井戸が見つかる。1999年度以降、基準項目への硝酸・亜硝酸性窒素の追加で、超過井戸が大幅に増えた。

5

浸透しにくい重金属等の汚染は土壌に 比べ地下水では少ない



汚染物質	件数	汚染物質	件数
トリクロロエチレン	748	鉛	2,481
テトラクロロエチレン	644	ヒ素	1,397
ベンゼン	582	フッ素	1,371
シス-1,2-ジクロロエチレン	528	六価クロム	752

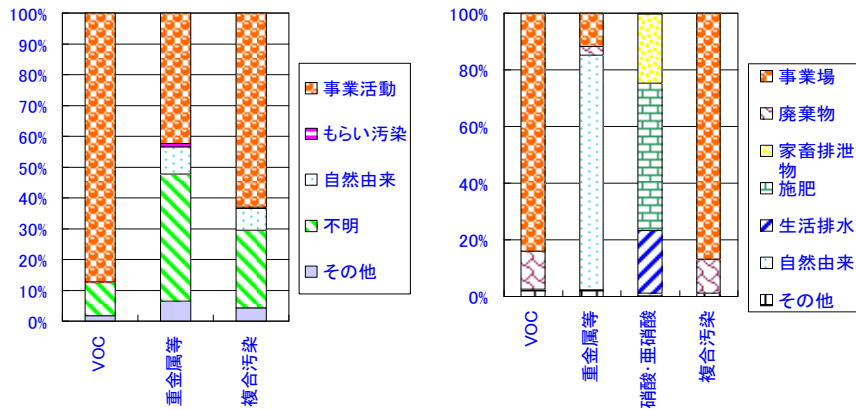
汚染物質ごとの土壌環境基準超過事例数 (2009年度末累計)
VOCより重金属等がはるかに多い。硝酸性窒素の土壌環境基準は設定されていない。

汚染物質	件数	汚染物質	件数
トリクロロエチレン	587	ヒ素	598
テトラクロロエチレン	429	フッ素	261
シス-1,2-ジクロロエチレン	363	ホウ素	107
ベンゼン	122	鉛	67

汚染物質ごとの地下水汚染事例数 (2009年度末時点)
硝酸・亜硝酸性窒素が、1,553件と最も多く、重金属等よりもVOCの方が多。

6

汚染物質によって汚染原因が大きく異なる



土壌汚染の原因 (2009年度累計)
VOCは地下水汚染と同様、事業場が多い。重金属等は不明のものが多く、多くは自然由来と断定できないもの。

地下水汚染の原因 (2009年度末時点)
汚染物質により原因が大きく異なる。VOCは事業場や廃棄物など人為由来の汚染。重金属等は自然由来が多い。

7

地面の下はどのような構造になっているか

地下空間の構造 地下空間は地上と同様に3相に分かれ、土粒子の間隙に存在する水の一部が地下水として流れている。	土の3相分布	土は様々な大きさと形を持った土粒子が集合してできたもので、その間隙に水や空気を含んでいる。 固相(土粒子)、液相(水)、気相(空気)	
	地中水	結合水	土粒子表面に吸着している水
		自由水	結合水の周辺に存在している水
			重力水 重力により移動する水
			毛管水 毛管現象で保持されている水
	地下水	空隙が水で満たされている土(飽和土)の中の水	
	土壌水	空隙が水で満たされていない土(不飽和土)の中の水	

透水係数 (cm/s)

		10 ⁻⁹	10 ⁻⁷	10 ⁻⁵	10 ⁻³	10 ⁻¹	10 ¹	10 ²
透水性		実質上不透水	非常に低い	低い	中位	高い		
土の種類	粘性土	微細砂 シルト		砂、シルト、粘性土の混合土		砂礫	礫	

土の種類と透水性
有効空隙率が小さい粘性土やシルトの中は水や空気が流れにくい。また、有機分を含む粘性土、シルトなど是有機物が吸着しやすい。

8

どのような汚染物質が地下水を汚染しやすいか

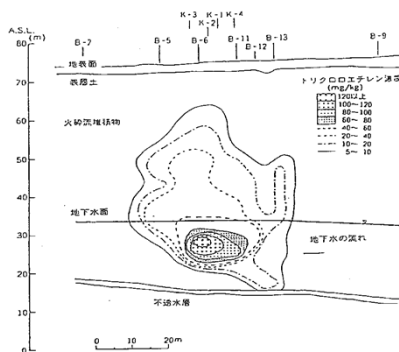
特性	汚染を起こしやすい	汚染が継続しやすい
侵入形態	地下水に近いところへの侵入	大量の侵入
汚染物質の性状	水の溶けやすい	水に溶けにくい
	土壌・地下水中で分解されにくい	
	液状、重い、粘性が低い	
	土壌に吸着しにくい	
土壌の性質	微生物が繁殖しにくい	
	有機物含量が少ない	
	透水性が高い	透水性が低い

地下水を汚染しやすい物質
揮発性有機塩素化合物は、とくに地下水汚染を起こやすく、継続しやすい特性も兼ね備えている。一方、重金属類やダイオキシンは地下水を汚染しにくい。

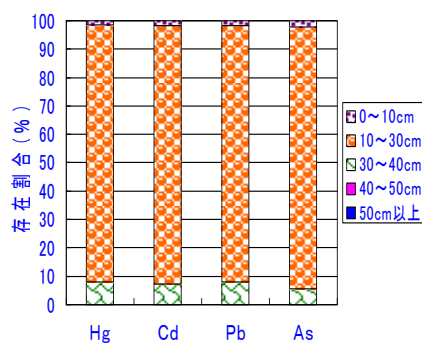
性状	揮発性有機塩素化合物	揮発性炭化水素	高蓄積性有機物	重金属等	無機イオン
化合物例	トリクロロエチレン、ジクロロメタン	ベンゼン、トルエン、油	ダイオキシン、フタル酸エステル	カドミウム、鉛、ヒ素、水銀	硝酸性・亜硝酸性窒素
難分解	○	△	△～◎	◎	○
低吸着	◎	◎	×	×	△
液状	◎	◎	△	×	×
重い	◎	×	△	—	—
低粘性	◎	◎	×	—	—
水溶性	△	△	×	△	◎

9

VOCは帯水層付近まで浸透するが、重金属類は表層土壌にとどまる



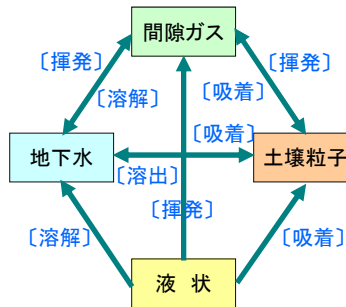
汚染源土壌中のトリクロロエチレン濃度分布
VOCは横に広がらず、地下浸透して、帯水層付近に滞留し、地下水汚染を起こす。



汚染土壌の重金属等の鉛直移動
工場跡地汚染土壌の浸透実験(7ヶ月、1067mm降雨)でも重金属等はほとんど移動していない。

10

汚染物質はどのような形で地下空間に存在するか



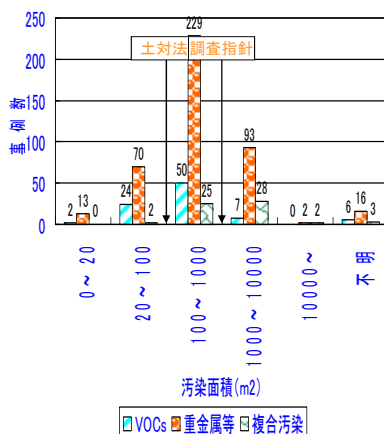
地下空間での汚染物質の存在

汚染物質はその性状に応じて、地下空間の構成要素の間で分配される。重金属は主に土壌粒子に吸着して存在するが、VOCは様々な形態に分配されて存在する。

汚染物質	土壌 (mg/kg)	地下水 (mg/L)	土壌ガス (ppmv)
トリクロロエチレン	865	137	1,500
トリクロロエチレン	6,600	140	—
トリクロロエチレン	40	360,000	—
トリクロロエチレン	10	410	—
トリクロロエチレン	138	455	9,400
トリクロロエチレン	232	1,390	—
トリクロロエチレン	210,000	40	—
トリクロロエチレン	4,300	28	—
テトラクロロエチレン	14,000	75	—
テトラクロロエチレン	360	80	—
テトラクロロエチレン	8,100	33	14,000
テトラクロロエチレン	25,000	22	3,000
テトラクロロエチレン	62,000	160	14,000

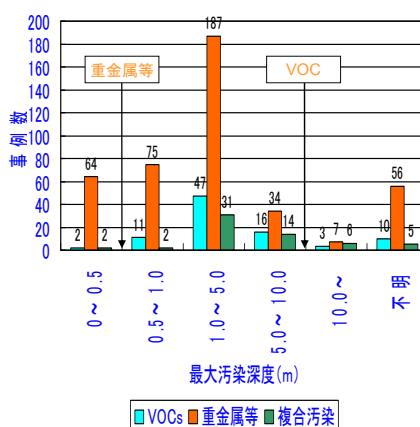
11

土壌中の汚染物質の動きは小さく、高濃度汚染は狭い範囲にとどまる



土壌汚染の平面分布 (2009年度)

土壌汚染の面積は1/4以上が1000m²以下であり、土壌汚染対策法の調査密度100m²よりも狭い汚染も存在する。

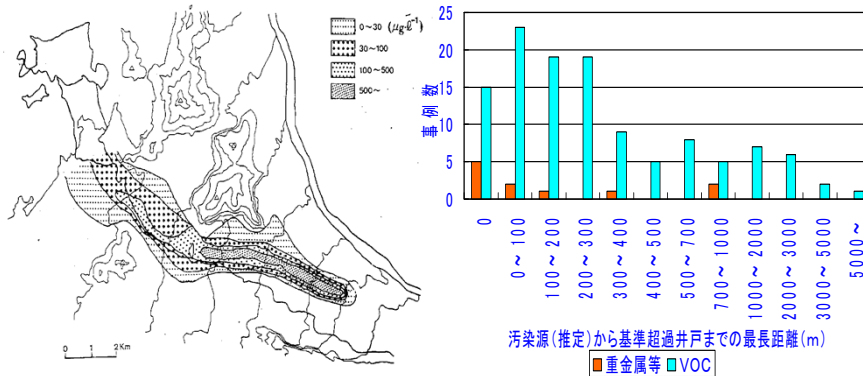


土壌汚染の鉛直分布 (2009年度)

VOCの方が深くまで浸透するが、重金属も土対法で求められる調査深度よりも深い汚染が存在する。

12

地下水汚染はその流れにのって広がるが、汚染範囲はあまり広くならない

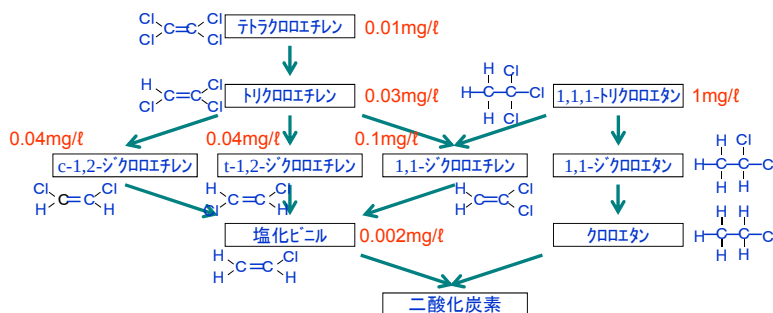


わが国で最も大きな地下水汚染
旧河道を通して細長く広がったトリクロロエチレンの地下水汚染。縦11km、横2kmにわたって環境基準を超える汚染が見られる。

地下水汚染の広がり分布
縦方向の広がりが1kmを超える地下水汚染は少ない。汚染井戸が1本しか見つからない場合も多い。重金属等は六価クロムを除いて汚染範囲が狭い。

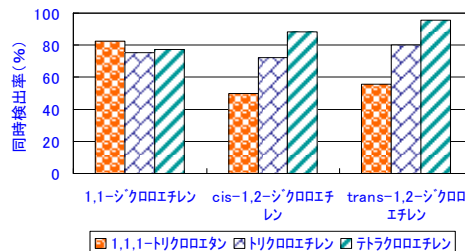
13

微生物分解や化学反応によって地下空間で毒性の高いものに変化する



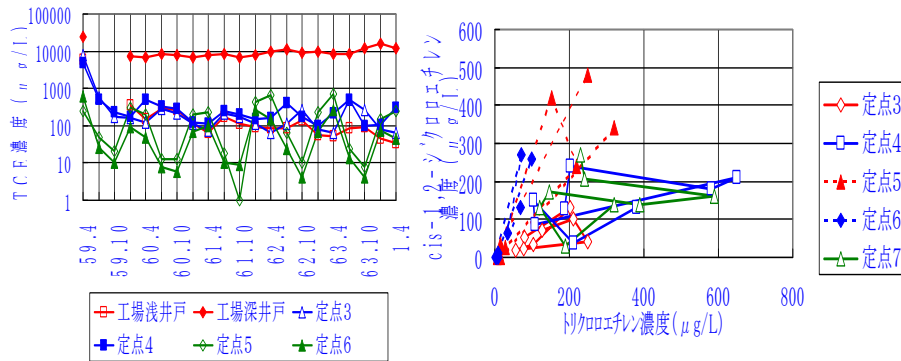
嫌気条件での脱塩素反応

微生物の働きや化学反応によって最終的には二酸化炭素にまで分解されるが、その途中で毒性の高いものが生成する。地下水から検出されるジクロロエチレン類や塩化ビニルはほとんどが分解生成物である。



14

地下水位の季節的な変動が 地下水濃度に大きな変化をもたらす



地下水濃度の季節変化

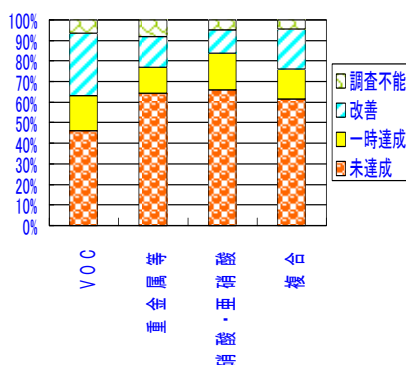
地下水位が上昇すると、地下水が汚染土壌に接し、地下水濃度が上昇する。汚染土壌がないところでは、水位の上昇で地下水が増えると希釈され、地下水濃度が低下する。地下水位の変化しない深井戸の濃度は季節変動しない。

分解生成物濃度の季節変化

トリクロロエチレンは土壌に吸着したままでは分解されないため、地下水位が上昇すると、トリクロロエチレンは土壌から溶け出し濃度が上昇するが、ジクロロエチレン濃度は水位に寄らず変化しない。

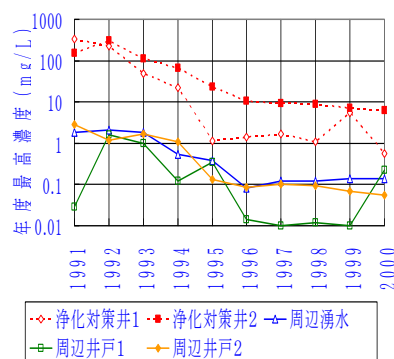
15

地下水は、汚染物質の動きが遅く、 対策を実施しても容易に浄化されない



地下水基準の達成状況 (2009年度末)

地下水汚染が判明した事例の多くは、改善がみられず、基準超過のままで経過している。地下水汚染の改善には時間がかかる。

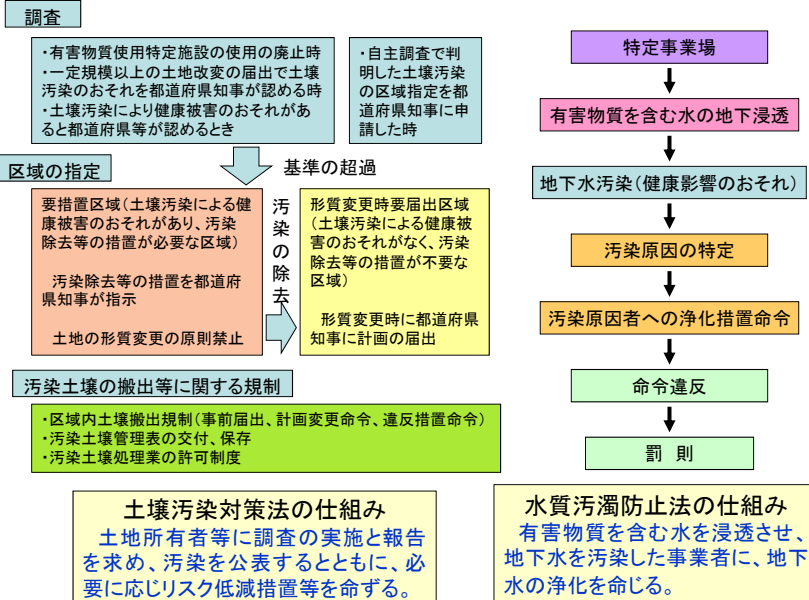


地下水濃度の年変化

対策を行っても地下水濃度は容易には低下しない。トリクロロエチレンを1トン以上取り除いても、地下水濃度は基準の100倍を超え、周辺井戸も基準を超過したままである。

16

土壌・地下水汚染に対処する法制度



17

土壌汚染対策法の改正（2010年度）

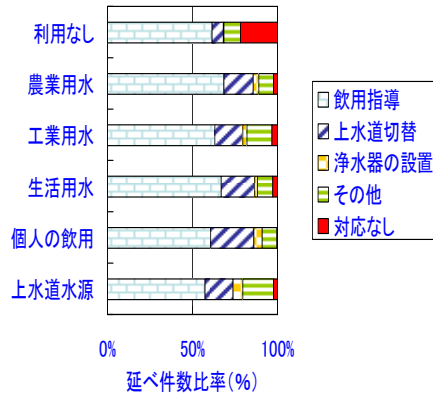
- 現状と問題点**
土壌汚染対策法の施行状況の評価により、問題点が抽出された。
- 見直しの概要**
現状の問題点を解決するための見直しが行われた。
- 1. 法に基づかない土壌汚染の発見の増加**
（発見された汚染土壌の適正管理への不安）
 - 2. 掘削除去の偏重**
（土地所有者等の過剰な負担、掘削除去による環境負荷）
 - 3. 汚染土壌の不適正な処理による汚染の拡散**
（汚染土壌の不適正の処理事案の発生）
- 1. 土壌の汚染状況の把握のための制度の拡充**
 - （1）一定規模以上（3,000㎡）の土地であって土壌汚染のおそれのある土地の形質変更時の土壌汚染の調査命令
 - （2）自主調査で土壌汚染が判明した場合、土地所有者等の申請に基づき、区域指定し、適切に管理
 - （3）土壌汚染に関する情報の収集、整理、保存、提供等に関する都道府県知事の努力義務
 - 2. 規制対象区域の分類等による措置内容の明確化等**
 - ① 土地の形質変更時に届出が必要な区域（形質変更時要届出区域）
 - ② 盛土、封じ込め等の対策が必要な区域（要措置区域）
 - 3. 搬出土壌の適正処理の確保**
 - （1）区域内の土壌の排出規制（事前届出、計画変更命令、運搬・処理基準に違反した場合の措置命令）
 - （2）搬出土壌に関する管理票の交付及び保存の義務
 - （3）搬出土壌の処理業についての許可制度の新設
 - 4. その他**
 - （1）指定調査機関の信頼性の向上（指定の更新、技術管理者の設置等）
 - （2）その他規定の整備
 - （3）施行期日（平成22年4月1日）

18

地下水汚染に対しては、健康被害防止のため、浄化や飲用指導等が行われている

対策の内容	VOC	重金属等	複合
地下水揚水	638	80	56
土壌ガス吸引	248	0	14
汚染土壌処理	333	82	41
バイオレメディエーション	53	2	9
その他の原位置処理	96	8	12
その他	21	14	5
回答事例数	866	143	72

地下水汚染浄化対策(2009年度末累計)
複数の方法の組み合わせで対策が実施されている。地下水揚水が最も多く、土壌処理がこれに次いでいる。生物処理を含め、原位置浄化が少ずつ増えている。



飲用防止の実施状況 (2009年度末累計)

利用されている井戸のほとんどは何かの措置がなされている。しかし、個人使用の井戸についても個別指導がされていない場合が存在する。

19

土壌汚染に対しては法の求めを超える措置が実施されている

	第1種		第2種		第3種	
第2溶出量基準	適合	不適合	適合	不適合	適合	不適合
原位置封じ込め	○	△	○	△	○	×
遮水工封じ込め	○	△	○	△	○	×
地下水汚染拡大防止	○	○	○	○	○	○
土壌汚染除去	○	○	○	○	○	○
遮断工封じ込め	×	×	○	○	○	○
不溶化	×	×	○	×	×	×

△: 第2溶出量基準に適合させた後、可能

地下水経路のリスク低減措置

直接摂取には原則、盛土が命じられる。地下水摂取については原位置あるいは遮水工封じ込めが原則命じられる。

	VOCs	重金属等	複合
地下水質測定	227	214	110
原位置浄化	662	92	276
掘削除去	426	2,296	423
原位置封じ込め	11	80	31
遮水工封じ込め	0	13	9
原位置不溶化	2	55	11
不溶化埋め戻し	2	66	8
遮断工封じ込め	2	23	6
土壌入れ替え	20	98	22
盛土	2	102	17
舗装	11	324	70
立入禁止	22	81	23
その他	118	120	38
合計回答数	812	2,687	526

土壌汚染対策の内容(2009年度末)

土壌汚染対策法の求めを超えて、重金属は掘削除去、VOCは原位置浄化が多い。

20

土壌・地下水汚染問題の今後の課題

●未対応のリスク

- ・未対応の健康リスク: 揮発による大気汚染や水域流入による魚介類汚染
- ・生活環境リスク: 生態系保全、悪臭などの生活環境保全

●調査手法の高精度化

- ・調査手法の高精度化: 試料採取による誤差
- ・調査費用の低減: 調査密度、調査深度の適正化

●対策コストの低減

- ・汚染の状況に合わせた対策技術の選定
- ・時間をかけた対応の実施

21

土壌・地下水汚染にどのように 向き合うか

- ・ 過去の負の遺産である土壌・地下水汚染とは、近づかないようにして、健康被害の発生を防ぐ。
- ・ 早い段階で汚染の存在を確認し、時間をかけてきれいにしていく。
- ・ 汚染の有無が分からないまま、近づくことのないように、汚染の存在を社会全体が認知する。
- ・ 汚染の特性を正しく理解し、土壌・地下水汚染と向き合う。

22