

薬剤による土壌のカドミウム浄化技術 確立実証調査計画指針

平成 19 年 7 月

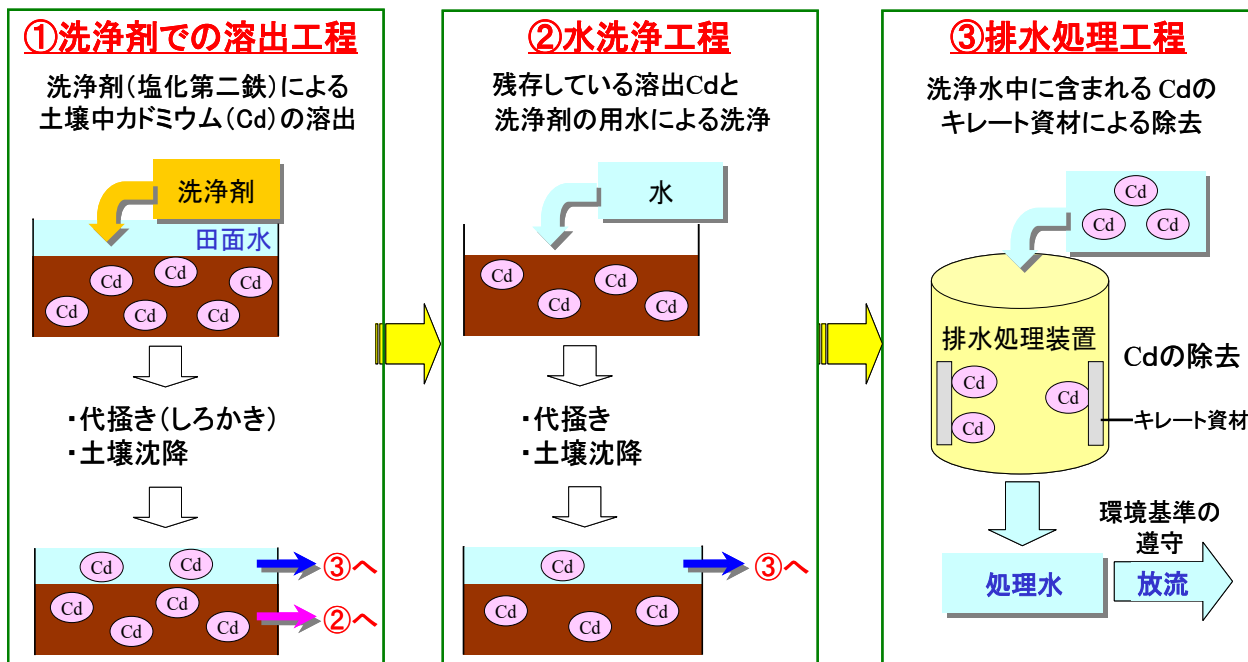
**農 林 水 産 省
(独) 農業環境技術研究所**

1. 本指針の目的

現在、国内において食品中に含まれるカドミウムの基準値の検討が進む中、これまで客土等の対策に代わる低コストの新たな土壤汚染対策技術の確立が急務となっている。

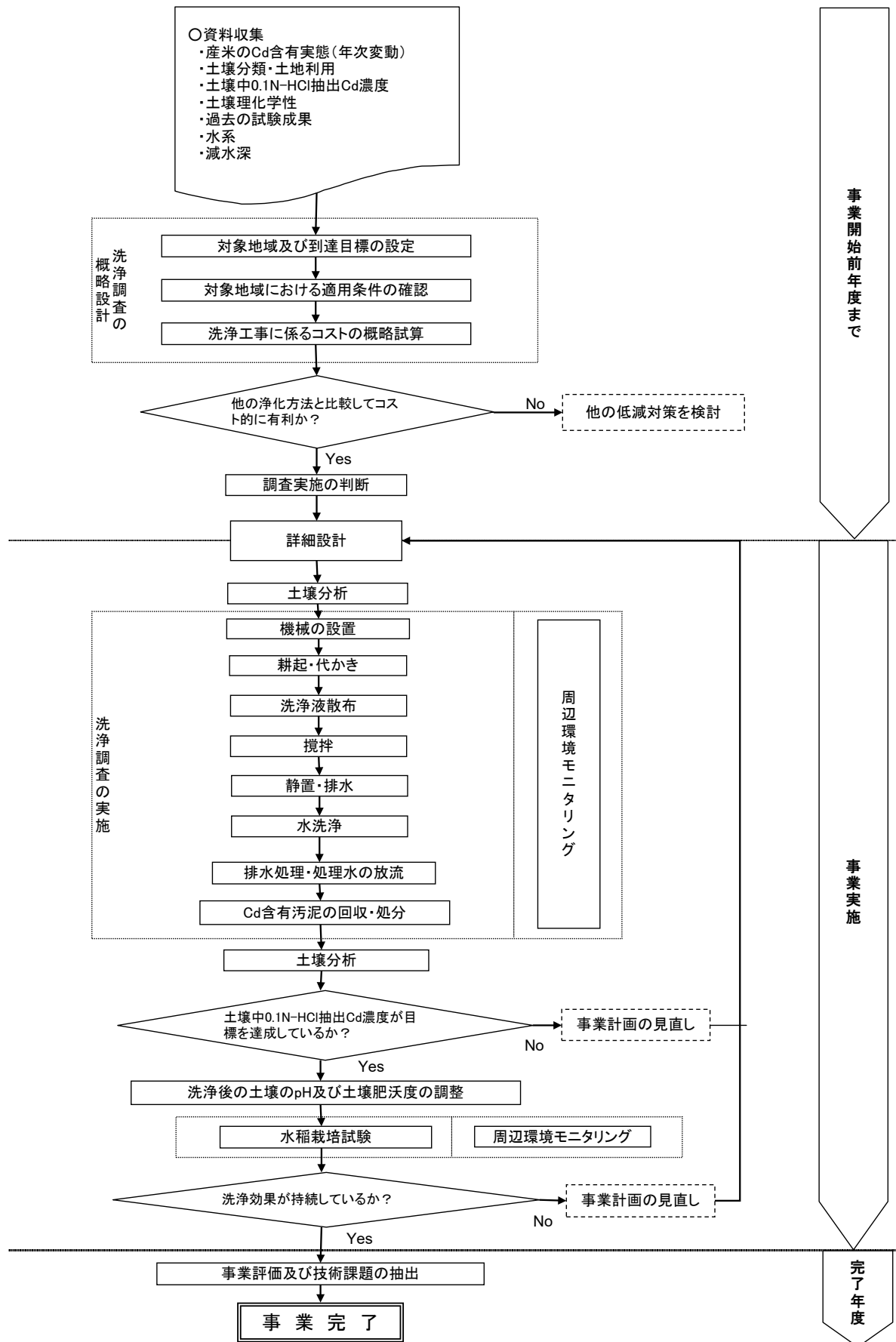
本指針は、そのような土壤汚染対策技術の一つとして期待されている薬剤を用いた土壤洗浄技術の実用化に向けた実証事業を効果的かつ効率的に推進するために、これまで実施された試験等の成果を踏まえて、調査実施に当たっての留意点、ポイントをまとめたものである。

なお、今回の指針は、第一次案として、現段階でオーソライズされた技術の内容を中心に記載しているが、現在、農林水産生態系における有害化学物質の総合管理技術の開発「主要作物のカドミウム吸収・蓄積を抑制するための総合管理技術の開発」等において取り組まれている研究開発において新たな成果が得られれば、これを踏まえて、その都度更新することとしている。



土壤洗浄技術のイメージ

2. 調査フロー



3. 調査計画の策定及び洗浄工事

(1) 洗浄試験の概略設計

A 対象地域及び到達目標の設定

過去に実施したコメの Cd 含有実態調査における Cd 濃度等を考慮し、本調査の対象地域の範囲を決定の上、本調査における到達目標について、以下の項目について設定する。

A. 玄米中の Cd 濃度（目標値）

B. 土壌中 0.1N-HCl 抽出 Cd 濃度（目標とする玄米中の Cd 濃度から算出）

[解説]

○到達目標設定の方法

ア 玄米中 Cd 濃度 0.4 ppm 以上のコメが生産されたほ場から採取した土壌の 0.1N-HCl 抽出 Cd 濃度を測定 (C_{soil1})。

イ 玄米中 Cd 濃度（実証ほ場で採取した玄米の最大値）を C_{rice1} とし、また、玄米中 Cd 濃度の目標値 C_{riceG} を設定。

ウ ア、イから、目標となる 0.1N-HCl 抽出土壌中 Cd 濃度 (C_{soilG}) を $C_{rice_G} / C_{rice1} * C_{soil1}$ と設定。

○目標値設定の算出例

項 目	算出式	計算例
玄米中の Cd 濃度 (実証ほ場で採取した玄米の最大値)	C_{rice1}	0.70 ppm
当該ほ場の土壌中 0.1N-HCl 抽出 Cd 濃度	C_{soil1}	0.75 ppm
目標玄米中 Cd 濃度	C_{riceG}	0.30 ppm
目標土壌中 0.1N-HCl 抽出 Cd 濃度	$C_{soilG} = C_{soil1} * C_{riceG} / C_{rice1}$	0.32 ppm

○試料の採取及び分析方法については本指針（４）①に準ずるものとする。

B 対象地域における適用条件の確認

洗浄工事の概略を設計するに当たっては、以下の事項について確認を行うものとする。

A. 3（1）Aで設定した土壌中 0.1N-HCl 抽出 Cd 濃度の目標値を達成するために必要な洗浄液の濃度（洗浄に用いる薬剤は塩化第二鉄とする）、薬剤洗浄及び水洗浄の回数

B. 実証ほ場における減水深

[解説]

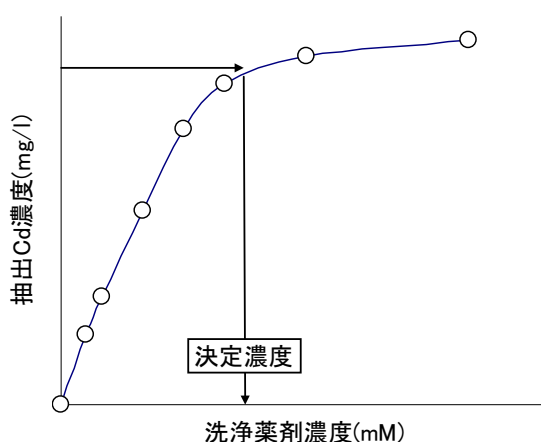
A. 洗浄工事を効果的・効率的に進めるためには、地域の土壌条件等に合致した洗浄液の濃度や洗浄回数により洗浄を行う必要がある。

洗浄工事に係るコストの概略試算に先立ち、予備試験を行い、洗浄液の濃度及び水洗浄の回数を決定する。（洗浄工事に係るコストの概略試算については、3（1）Cを参照）

以下は、灰色低地土における洗浄液濃度及び水洗浄回数の算出例。

○洗浄液濃度

ア 風乾土壌 10 g に 0、3、5、10、15、20、30、50mM の洗浄液 20ml を添加、1 時間振とう後、遠心分離、上澄み中の Cd 濃度を測定。洗浄液濃度 (Fec) と抽出 Cd 濃度 (Cdex) を測定。洗浄液濃度と抽出 Cd 濃度との関係図を作成する。関係図から抽出 Cd 濃度が頭打ちとなった洗浄液濃度を算出とする。



イ 次の計算式からアで算出した洗浄液濃度において予想土壌 Cd 残留濃度 (Cdsoil) が目標土壌中 Cd 濃度 (CsoilG) (3 (1) A参照) を下回ることを確認する。

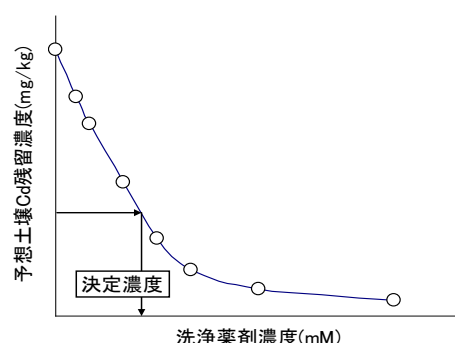
$$Cdsoil = Csoil1 - 1.6Cdex \quad ※1$$

Csoil1:土壌中 0.1M-HCl 抽出濃度 (3 (1) A参照)

ウ アで算出した洗浄液濃度が $\leq 30\text{mM}$ の場合、頭打ちとなった洗浄液濃度を洗浄に用いる薬剤の濃度とする。

エ アで算出した洗浄液濃度が $> 30\text{mM}$ の場合、次の計算式から洗浄液濃度と予想土壌 Cd 残留濃度 (Cdsoil) との関係図を作成し、その結果、予想土壌 Cd 残留濃度と目標土壌 Cd 濃度が一致する洗浄液濃度を洗浄に用いる薬剤の濃度とする。

$$Cdsoil = Csoil1 - 1.6Cdex \quad ※1$$



※1 計算式の根拠は以下のとおり

前提条件として、薬剤洗浄は1回、水洗浄は2回実施。薬剤及び水洗浄時の固液比 (w/v) は1 : 2 とする。

- ・抽出 Cd 濃度 (Cdex) (mg/l) $\times 2 =$ 抽出 Cd 量 (mg/kg) (固液比 1 : 2 のため)
- ・田面水の排出率は洗浄1回あたりおよそ 50% (これまでの試験結果より)

従って

薬剤洗浄に於ける Cd 除去率は $Cdex \times 2 \times 0.5$ ①

水洗浄1回目における Cd 除去率は $(Cdex \times 2 \times 0.5) \times 0.5 = Cdex \times 2 \times 0.25$ ②

水洗浄2回目における Cd 除去率は $\{(Cdex \times 2 \times 0.5) \times 0.5\} \times 0.5 = Cdex \times 2 \times 0.125$ ③

①②③を合計した Cd 除去率は $Cdex \times 2 \times 0.875 = Cdex \times 1.75$

10%程度の安全率をみて 1.6 を係数とした。

○洗浄回数

ア 薬剤洗浄は1回を基本とする。

イ 水洗浄の回数(n)は、次の計算式のnに1、2、3・・・を順次入れて計算し、初めて残留 Cl^- 濃度が水稻の生育に影響を与えない濃度（3（2）A⑦参照）以下となった回数とする。

$$\text{残留 } \text{Cl}^- \text{ 濃度} = \text{洗浄液濃度}(\text{Fec}) \times 106 \times (1/2)^n$$

＜水稻の生育に影響を与えない濃度 ※2

なお、過去に試験をした地域の結果では水洗浄2～3回が適当であった。

※2 計算式の根拠は以下のとおり

- ・田面水の排出率は洗浄1回あたりおおよそ50%（これまでの試験結果より）
- ・塩化第二鉄（ FeCl_3 ）1mMは塩素3mMを含む。
- ・塩素の原子量は35.5（mg/mM）。
- ・塩素は土壌にほとんど吸着しない。

従って、

$$\text{Fec}(\text{mM}) \times 3 \times 35.5$$

$$\rightleftharpoons \text{Fec} \times 106 = \text{薬剤洗浄時の塩素濃度}(\text{mg/l}),$$

水洗1回で塩素濃度は1/2に低下することから、水洗n回後の残留 Cl^- 濃度(mg/l)は

$$\text{残留 } \text{Cl}^- \text{ 濃度} = \text{Fec} \times 106 \times (1/2)^n$$

B. 洗浄工事の実施に当たっては、洗浄水の漏出を防止する必要があることから、洗浄工事を実施するほ場の減水深が40mm以内でない場合は、事前に床締め等を行い、ほ場からの漏水を防止する。

C 洗浄工事に係るコストの概略試算

3 (1) Aで策定した土壌中 0.1N-HCl 抽出 Cd 濃度の目標値を達成するための洗浄工事に係るコストについて、以下の事項をもとに試算を行う。

- ① 洗浄工事の実施面積
- ② 洗浄液濃度 (3 (1) Bで算出)
- ③ 薬剤洗浄及び水洗浄の回数 (3 (1) Bで算出)
- ④ ①②③から算出された洗浄日数

[解説]

洗浄工事に係るコストの試算結果と近傍地区における客土等に係る工事費と比較を行い、本技術がコスト的に有利であると見込めると判断された場合には調査実施を判断。

○洗浄工事に係るコストの例

過去に試験を実施した一地域の結果をもとに試算。

〈前提条件〉

ア. 洗浄工事实施面積：2 ha

イ. 洗浄液（塩化第二鉄）濃度：15 mM

ウ. 薬剤洗浄回数：1回、水洗浄回数：2回

エ. 工事日数：100日

（工事日数については、ア～ウと同様の条件においても、ほ場の形状や土壌 Cd 濃度、洗浄する土壌深度、確保できる用水量などにより変動する）

〈洗浄工事に係るコスト〉

10a 当たり 410 万円

（上記コストには、周辺環境モニタリング調査や水稻栽培試験等の付帯する試験研究費は含まない）

(2) 洗浄試験の実施

A 洗浄試験実施に当たっての留意事項

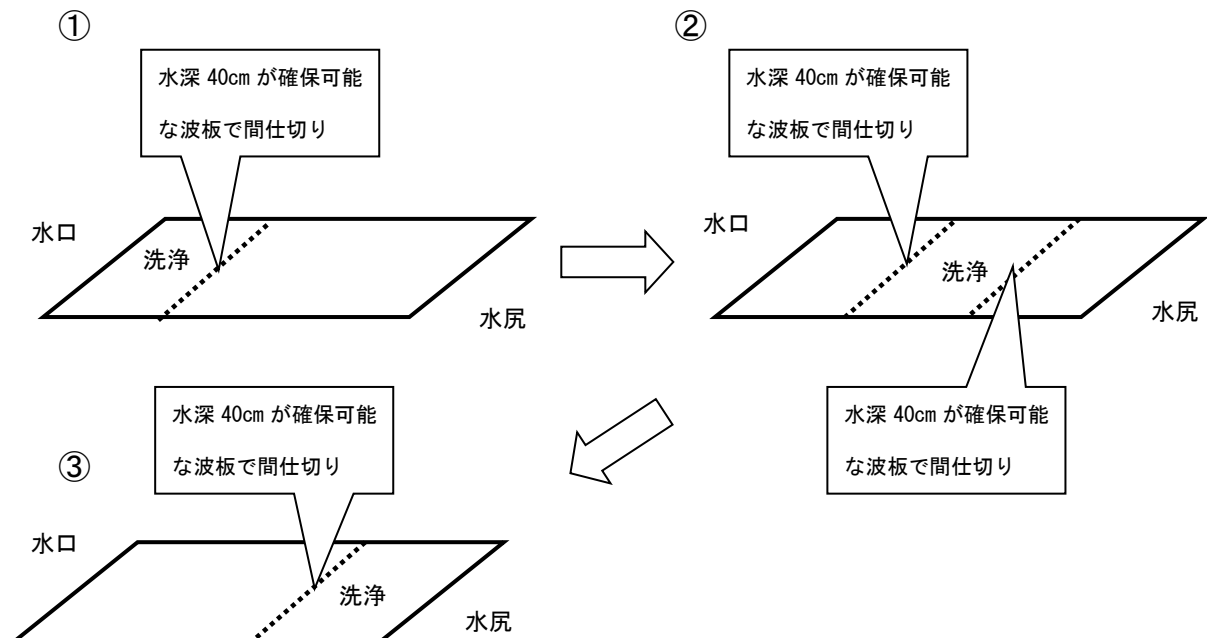
① 試験区の設定

洗浄試験における単位試験区の面積は 10～30a とする。

[解説]

30a 以上のほ場において試験を実施する場合は以下のとおり、波板では場の間仕切りを行い実施する。

○ほ場面積 30a 以上の場合



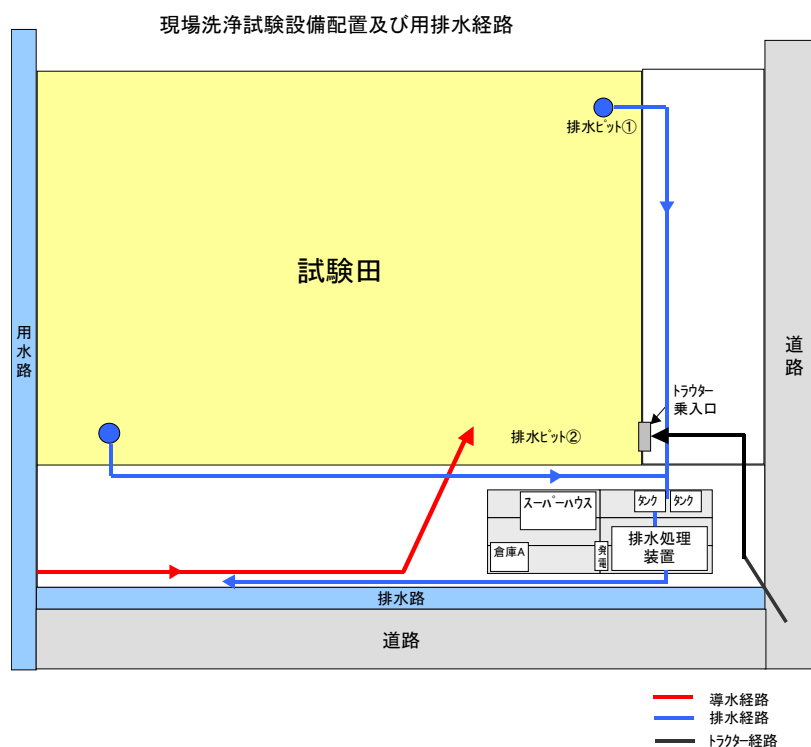
② 機械の設置

試験の実施に当たっては、排水処理機等機械設備を設置する。
排水処理機等の機械設備を設置するため、ほ場の近傍に最低限 15m × 15m の用地を確保する。

また、洗浄工事による周辺環境への影響を調査するため、ほ場周辺に地下水のモニタリング孔を設置する。

ほ場は、設備搬入のために 4 t 車通行可能な道路に隣接することが望ましい。

[解説]



③ 耕起・代かき

洗浄液を散布する前に耕起と代かきを行う。

耕起を行う際には土壌の酸化還元状態を確認し、必要に応じて念入りに耕起を行う。

[解説]

土壌が還元状態にあると洗浄液中の鉄が Fe^{3+} から Fe^{2+} に還元され洗浄効果が低下する。

代かき前の耕起を行う際には、作土層の土壌についてジピルジル反応により酸化還元状態を確認し、土壌が還元状態にある場合は、酸化状態となるよう念入りに耕起を行う。

④ 洗浄液散布

洗浄液のほ場への散布は、ほ場全体に行き渡るようにする。

[解説]

洗浄液のほ場への散布に当たっては、①水口から散布を行う、②送水ポンプにより散水を行う（下記の写真参照）など、洗浄液がほ場全体に行き渡るようにする。



⑤ 攪拌

洗浄液を散布した後、攪拌を行う。

攪拌を行う際の水深は 40cm 以上とし、耕盤を痛めないよう攪拌の深度を一定に保つ。

[解説]

薬剤洗浄においては、固液比を高めることにより洗浄効率が向上することから攪拌を行う際の水深は 40cm 以上を確保する。

畦の高さが足りない場合は、ほ場周囲に波板等を設置し、水深を確保する。

攪拌に用いるトラクターは、下層土の巻き上げを防止するため、攪拌深度を一定に保ちかつ耕盤を痛めないような機能をもったものを用いる。

⑥ 静置・排水

攪拌後静置を行い、ほ場の水の上澄みが 3 cm 程度になったら排水を開始し、田面の土壌が露出するまで排水を行う。

[解説]

薬剤洗浄においては攪拌を行ったあと静置を行い、ほ場の水の上澄みが 3 cm 程度となったら排水を開始し、土壌の沈降が終了するまで行う。

排水効率をあげるため、排水処理装置の能力を考慮しながら 2～3 カ所から排水を行う。

⑦ 水洗浄

薬剤洗浄を実施した後、水洗浄を実施する。

水洗浄は、用水をほ場に入れた後、薬剤洗浄同様⑤⑥の操作を行うこととし、田面水の Cl^- 濃度が水稻の生育に影響を与えない濃度以下となるまで繰り返し行う。

〔解説〕

水洗浄は、田面水中の Cl^- 濃度が、地域における営農指針などに定められた基準等の水稻の生育に影響を与えない濃度となるまで繰り返し行う。

指標となる Cl^- 濃度が定められていない地域においては、地域の用水中における Cl^- 濃度や以下の数値等を参考に水洗浄を行う。

○指標の例

- ・ Cl^- 濃度として 500～700mg/l 以下（水稻の活着期における塩害発現限界塩素濃度 千葉県資料）
- ・ 電気伝導度として 0.3mS/cm 以下（農業用水基準 農林水産省）
- ・ 土壌中の塩類濃度として 1,000ppm～2,000ppm 以下（水稻の減収を伴わない土壌の塩類濃度 塩類集積土壌と農業 日本土壌肥料学会編）

⑧ 排水処理・処理水の放流

排水は処理装置により環境基本法に基づき定められた「水質汚濁に係る環境基準について」において定められた基準等に適応するよう適切に処理後、放流する。

○処理水の測定項目

- ・ pH
- ・ Cd
- ・ Cl^-

[解説]

○排水装置による処理を行った処理水の事例

測定項目	処理前	処理後	水質汚濁に係る環境基準
pH	2.6～3.7	6.6～7.0	6.5～8.5
Cd	0.01～0.10	0.005mg/l 以下	0.01mg/l

○ Cl^- については、放流域（排水路、河川など）の流量と排水中の Cl^- 濃度及び量による希釈率を考慮し、放流域で⑦において水洗浄の回数決定の指標とした水稻の生育に影響を与えない濃度以下となるよう排水する。

⑨ Cd 含有汚泥の回収・処分

排水処理装置から生じた Cd 含有汚泥は、産業廃棄物として適切に処分する。

[解説]

Cd 含有汚泥はキレート処理等を行い、産業廃棄物として適切に処理を行う。

⑩ 洗浄後の土壌 pH 及び土壌肥沃度の調整

洗浄後は、炭カルを施用して土壌 pH を調整するとともに、洗浄により含有量が低下した Mg^{+} 、 K^{+} の補充を行うものとする。
また、洗浄後は土壌の攪拌を十分に行うものとする。

[解説]

洗浄後は洗浄前に比べ土壌 pH が低下することから、土壌分析を行い、pH が洗浄前と同様となるよう炭酸カルシウムを施用する。

また、洗浄により含有量が低下した Mg^{+} 、 K^{+} の補充を行うため肥料を施用する。

さらに、攪拌後の土壌の沈降の際、粒子の大きなものから沈降し土壌が層状に分離することから、土壌の攪拌を十分に行う。

○洗浄後の土壌 pH 及び交換性陽イオンの事例

測定項目	洗浄前	洗浄後
土壌 pH(H2O)	5.56	4.33
土壌 pH(KCl)	4.22	3.78
Mg^{+}	1.35	0.98
K^{+}	0.57	0.32

※ Mg^{+} 、 K^{+} は me/100g 乾土で表示

⑪ 周辺環境モニタリング

洗浄調査を実施する際には、周辺環境への影響を調査するため、併せて以下の調査を実施する。

- A. 地下水のモニタリング調査
- B. 微生物への影響評価

[解説]

○地下水のモニタリング

洗浄水の周辺環境への漏出の有無を確認するため、ほ場周辺の地下水のモニタリング調査を実施する。

○微生物への影響評価

洗浄処理による土壌微生物への影響評価を行うため、クロロホルム燻蒸法による微生物バイオマスを測定する。(測定法は土壌環境分析法・日本土壌肥料学会監修・博友社に準ずる)。

B 分析

① 事業効果の測定に係る分析項目、環境モニタリング項目、処理水の測定項目

事業効果の測定に係る分析項目及び環境モニタリング項目は、それぞれ以下のとおりとする。

なお、分析方法は「土壌、水質及び植物体分析方法」（平成 13 年 3 月（財）日本土壌協会編）に準ずるものとする。

A. 事業効果の測定に係る分析項目

① 土壌中 Cd 濃度

- ・ 酸分解 全 Cd 濃度
- ・ 0.1M-HCl 抽出 Cd 濃度
- ・ 0.01M-HCl 抽出 Cd 濃度
- ・ 1M 硝酸アンモニウム(pH7)抽出 Cd 濃度

なお、同時分析が可能な場合は、必要に応じ Cu, Zn, Cr, Co, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na 等の各種元素についても測定を行う。

② 土壌肥沃度

- ・ pH (H₂O, KCl)
- ・ 電気伝導度 (EC)
- ・ 可給態窒素
- ・ 可給態リン酸
- ・ 陽イオン交換容量 (CEC)
- ・ 交換性陽イオン (Mg⁺、K⁺、Ca)
- ・ 全炭素
- ・ 全窒素

B. 環境モニタリング項目

①地下水

- ・ Cd
- ・ pH
- ・ Cl^-

②微生物への影響評価

- ・ 土壌バイオマス炭素

② 試料の採取時期と採取方法

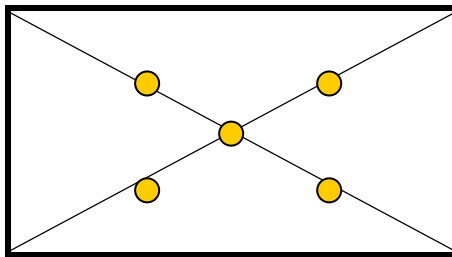
事業効果の測定に係る土壌の採取については、洗浄前と洗浄後に行う。

また、環境モニタリングのための地下水の採取は、洗浄工事実施中に1日1回行う。

それぞれの採取方法は以下のとおりとする。

[解説]

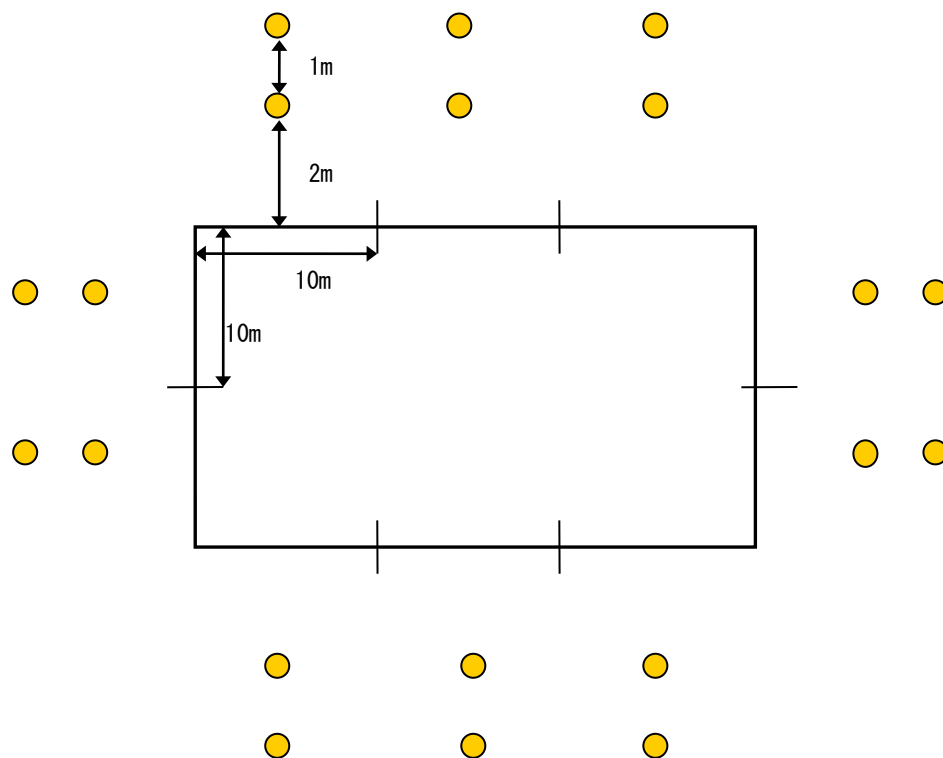
○土壌のサンプリング方法



ほ場に対角線を引き、中央から1カ所、それぞれの対角線上から各1カ所の計5カ所から採取する。(上図参照)

検土杖を用い地表下20cmまでの土壌を1カ所当り3～4本採取する。

○環境モニタリングの地下水の採取方法



10m間隔で畦の外側2カ所（畦から2mと3mの地点）に地表下1mまでボーリング孔を掘り採取する。

なお、実証ほ場周辺の条件や作業性等により上記のモニタリング孔の設置が困難な場合は、地下水の流れ等を考慮の上、適切な配置でモニタリング孔の設置を行うものとする。

C 水稲栽培試験の設計と実施期間

洗浄による効果の持続性を検証するため、地域において通常栽培している水稲品種を節水条件により栽培し、土壌 Cd 濃度と玄米 Cd 濃度の経年変化を確認する。

土壌については水稲の作付前と作付後、玄米については収穫後に試料採取を行うものとする。

また、水稲栽培中は月に 1 回、地下水の環境モニタリング調査を実施する。

試験の実施期間は 3 カ年とする。

〔解説〕

○土壌および玄米の Cd 濃度

分析方法は「土壌、水質及び植物体分析方法」（平成 13 年 3 月（財）日本土壌協会編）に準ずるものとし、試料の採取方法は以下のとおり。

・土壌の採取方法

3（3）B②に示す方法により採取を行う。

・玄米の採取方法

土壌を採取した地点から 20 株ずつ採取する。そのうち、6 株を任意に選定し試料とする。

○地下水の環境モニタリング調査

水稲栽培中は月 1 回地下水のモニタリング調査を実施する。試料採取は 3（2）B②、分析項目は 3（2）B①によるものとする。

(3) 調査結果の評価と調査設計へのフィードバック

① 調査結果の解析

以下の項目について解析を行う。

○洗浄試験実施後

- ・ 土壌中 Cd 濃度の低下量
- ・ 土壌中 Cd 以外の成分への影響
- ・ 周辺環境（地下水等）への影響
- ・ 排水の水質
- ・ その他技術的課題の抽出

○水稻栽培試験実施後（毎年）

- ・ 玄米中 Cd 濃度低下量と土壌中 Cd 濃度低下量の関係
- ・ 周辺環境（地下水等）への影響

② 次段階（他地域）の試験設計へのフィードバック

得られた調査結果をもとに、以下の項目について分析等を行い、他地域において本調査を実施する際の調査設計に反映させる。

- ・ 目標として設定した土壌 Cd 濃度と実際の調査結果において相違が生じた場合の要因

〔解説〕

他地域で本調査を実施する際の調査設計に反映できるよう、以下の場合はその要因について分析等を行うものとする。

○調査設計において目標として設定した土壌中 Cd 濃度と実際の調査結果に相違が生じた場合

〈分析を行う主な要因〉

- ・ 土壌の酸化還元状態
- ・ 薬剤洗浄の際の固液比
- ・ 洗浄液の濃度
- ・ 田面水の排水効率

(4) 事業完了後の算定項目

事業最終年完了後、以下の項目について測定又は算出を行う。

- ・ 土壌中 Cd 濃度及び玄米中 Cd 濃度
- ・ 総事業コスト（費目毎）

[解説]

事業最終年度には、事業評価を実施する。

具体的な評価に当たっては、以下の項目について検討を行う。

- ・ 土壌中 Cd 濃度及び玄米中 Cd 濃度に関する目標の達成度
- ・ 他の洗浄法（客土等）との比較による総事業コストの妥当性
- ・ 他地区へ本技術を適用する場合の課題

総事業コストの算出に当たっては、本事業に要した経費を各費目毎に算出する。

事業コストの妥当性の判断に係る客土等他の浄化方法との比較検討を行う際は、洗浄工事にかかるコストに加え、費目毎に算出したコストのうち、調査計画、周辺環境モニタリング調査、水稻栽培試験、データ解析及び評価にかかるコストなど必要な経費を算入する。

4. 事業評価のために必要なチェック項目

以下の項目について計画時点で設定した目標は達成したか？

- ☐ 玄米中の Cd 濃度
- ☐ 0.1N-HCl 抽出土壌中 Cd 濃度
- ☐ 事業結果は他の浄化方法（客土や水源転換等）と比較して、コスト的に有利であることが示されたか？

達成し得なかったのならば、その原因は何か？

- ☐ 土壌条件等に鑑み、洗浄液の濃度及び洗浄回数を選定は妥当であったか？
- ☐ 洗浄方法は妥当であったか？
（洗浄前のほ場準備は適切であったか？ほ場の洗浄液の攪拌は十分であったか？）
- ☐ 上記以外の原因として考えられる事項及び改善方策は何か？
（ 具体的に記述。 ）

その他のチェック項目

- ☐ （その他、チェック項目があれば記載）