

明 細 書

発明の名称：汚染土壌浄化システム

技術分野

[0001] 本開示は、汚染土壌浄化システムに関する。

背景技術

[0002] 特開２００５－５２７３３号公報には、油分解促進剤が添加された液体を油汚染土壌へ注入する浄化装置が開示されている。注入された液体は汚染土壌に浸透し、集水井戸から汲み上げられる。そして、汲み上げられた回収液の濁度を、濁度計や作業者の目視によって確認し、汚染土壌へ注入する油分解促進剤の添加量を調整している。

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0003] 上記特開２００５－５２７３３号公報に示された浄化装置では、回収液の確認及び汚染土壌へ注入する油分解促進剤の添加量の調整を、その都度手作業で行う必要があり、手間がかかる。

[0004] 本開示は上記事実を考慮して、汚染土壌を浄化するための作業を省人化できる汚染土壌浄化システムを提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0005] 本開示の第１態様の汚染土壌浄化システムは、汚染土壌内の汚染物質を分解するための汚染土壌浄化システムであって、汚染物質を分解する浄化剤又は前記浄化剤の生物的分解を活性化させる活性剤を含む注入液を注水井戸から前記汚染土壌へ注入する工程と、前記注水井戸から離れた場所に設けられた観測井戸内又は揚水井戸内の地下水における前記浄化剤又は前記活性剤の濃度を測定する工程と、測定された前記濃度に基づき、前記注入液への前記浄化剤又は前記活性剤の添加量又は前記揚水井戸からの揚水量を自動制御する工程と、を備えている。

[0006] 本開示の第１態様の汚染土壌浄化システムは、観測井戸内又は揚水井戸内

の地下水における浄化剤又は活性剤の濃度を原位置で測定し、測定した濃度に基づき、浄化剤又は活性剤の添加量又は揚水井戸からの揚水量を自動制御する。例えば、測定した濃度（すなわち汚染土壌内における活性剤の濃度）が目標濃度よりも低い場合は、自動的に注入液への活性剤添加量を増やす。又は自動的に揚水量を多くして地下水の吸引力を上げ、活性剤の汚染土壌中の浸透を促進させる。これにより、タイムリーに活性剤の濃度を調整し、汚染土壌を効率的に浄化することができる。

[0007] 本開示の第2態様の汚染土壌浄化システムは、前記注入液の注入を開始する前の前記観測井戸内又は前記揚水井戸内の地下水における前記浄化剤若しくは前記活性剤の初期濃度又は前記地下水の初期温度と、前記注水井戸から前記汚染土壌へ注入する前記注入液における前記浄化剤若しくは前記活性剤の注入濃度又は前記注入液の注入温度と、前記注入液の注入を開始してから経過時間と、前記汚染土壌固有の土壌物性と、に基づいて、経過時間毎の前記地下水の前記浄化剤若しくは前記活性剤の予測濃度又は前記地下水の予測温度を算出する管理関数によって、前記観測井戸内又は前記揚水井戸内の地下水における前記浄化剤又は前記活性剤の濃度が目標濃度に到達する時間を予測する、又は、前記観測井戸内又は前記揚水井戸内の地下水における前記地下水の温度が目標温度に到達する時間を予測する。

[0008] 本開示の第2態様の汚染土壌浄化システムでは、観測井戸又は揚水井戸における経過時間毎の地下水の浄化剤若しくは活性剤の予測濃度又は地下水の予測温度を、管理関数を用いて算出する。

[0009] この管理関数は、注入液の注入を開始する前の観測井戸内又は揚水井戸内の地下水における浄化剤若しくは活性剤の初期濃度又は地下水の初期温度と、注入液における浄化剤若しくは活性剤の注入濃度又は注入液の注入温度と、注入液の注入を開始してから経過時間と、汚染土壌固有の土壌物性と、に基づいて、経過時間毎の前記地下水の前記浄化剤若しくは前記活性剤の予測濃度又は前記地下水の予測温度を算出できるものである。

[0010] すなわち、汚染土壌内における地下水の浄化剤又は活性剤の濃度又は地下

水の温度が、目標値に到達するのに必要な時間を算出することで、汚染土壌の浄化を計画的に実施することができる。

[0011] 本開示の第3態様の汚染土壌浄化システムは、前記管理関数によって算出される前記予測濃度又は前記予測温度が、前記観測井戸内又は前記揚水井戸内の前記地下水における前記浄化剤若しくは前記活性剤の実測濃度又は前記地下水の実測温度と近似するように、前記初期濃度又は前記初期温度を所定時間経過後の前記観測井戸内又は揚水井戸内の地下水における前記浄化剤若しくは前記活性剤の濃度又は前記地下水の温度に置き換えると共に、前記注入濃度又は前記注入温度を変更して前記管理関数を補正する。

[0012] 本開示の第3態様に記載の汚染土壌浄化システムでは、管理関数によって算出される予測濃度又は予測温度と、実測濃度又は実測温度との差が縮まるように、注入液の注入濃度又は注入温度を変更すると共に、変更後の注入濃度又は注入温度に基づいて管理関数を補正する。また、管理関数の初期濃度又は初期温度を、所定時間経過後の地下水における濃度又は温度に置き換える。これにより、予測濃度と実測濃度との差又は予測温度と実測温度との差が縮まり、管理関数による予測精度を高くすることができる。

[0013] 管理関数の予測精度が高くなることで、汚染土壌に適切な量の浄化剤又は活性剤が添加された注入液又は適切な温度の注入液を注入することができる。これにより、汚染土壌中の浄化剤又は活性剤の過不足を抑制できる。

発明の効果

[0014] 本開示に係る汚染土壌浄化システムによると、汚染土壌を浄化するための作業を省人化できる。

図面の簡単な説明

[0015] [図1A]本開示の第1実施形態に係る汚染土壌浄化システムの概略構成を示す平面図である。

[図1B]本開示の第1実施形態に係る汚染土壌浄化システムの概略構成を示す立断面図である。

[図2]本開示の第1実施形態に係る汚染土壌浄化システムにおける土壌浄化方

法を示すフローチャートである。

[図3]本開示の第2実施形態に係る汚染土壌浄化システムにおける管理関数を示すグラフである。

[図4]本開示の第3実施形態に係る汚染土壌浄化システムにおける土壌浄化方法を示すフローチャートである。

[図5]本開示の第3実施形態に係る汚染土壌浄化システムにおいて補正前後の管理関数と実測濃度曲線を示すグラフである。

[図6]本開示の第4実施形態に係る汚染土壌浄化システムにおける土壌浄化方法を示すフローチャートである。

[図7]本開示の第4実施形態に係る汚染土壌浄化システムにおいて地下土壌への注入液の注入を停止及び再開する土壌浄化方法を示すグラフである。

[図8]本開示の第1実施形態に係る汚染土壌浄化システムにおける土壌浄化方法の変形例を示すフローチャートである。

[図9]本開示の第2実施形態に係る汚染土壌浄化システムにおいて、汚染物質の濃度が異なる2つの汚染土壌を浄化する変形例を示す平面図である。

[図10]本開示の第2実施形態に係る汚染土壌浄化システムにおいて、汚染物質の濃度が異なる2つの汚染土壌を浄化する場合に用いる2つの管理関数を示すグラフである。

発明を実施するための形態

[0016] 本開示の実施形態について、図面を参照しながら説明する。なお、複数の図面において同じ符号で表された共通の構成要素については、説明を省略する場合がある。

[0017] [第1実施形態]

(全体構成)

第1実施形態における汚染土壌浄化システム20は、図1A、図1Bに示す地下土壌10に含まれる汚染物質を分解するための汚染土壌浄化システムである。汚染土壌浄化システム20は、地下土壌10に構築された揚水井戸22、注水井戸24、観測井戸26及び遮水壁28と、地表面GLの上部に

構築され、地下土壌 10、揚水井戸 22 及び注水井戸 24 の間で地下水を還流させる浄化装置 30 と、を備えている。

[0018] (汚染土壌)

地下土壌 10 は、地表面 GL よりも下方の土壌であって、地下水が流れる帯水層 12 及び地下水が流れない不透水層 14 を備えている。この地下土壌 10 のうち、汚染物質が基準値（例えば汚染物質の種類毎に定められた値）以上含まれている部分を、汚染土壌 E とする。「汚染物質」とは、テトラクロロエチレン、トリクロロエチレン、シス-1, 2-ジクロロエチレン、塩化ビニルモノマー、ベンゼン等の有機物、シアン等の無機化合物、及びガソリンや軽油等の鉱油類を含む概念であり、以下では特に区別する場合を除いて、テトラクロロエチレン、トリクロロエチレン、シス-1, 2-ジクロロエチレン、塩化ビニルモノマー等の有機物を想定して説明する。

[0019] なお、図 1 B においては、地下水位 H を一点鎖線で図示しており、地下土壌内での地下水の流れの向きを破線の矢印で図示している。なお、この地下水の流れは注水井戸 24 から地下土壌 10 へ、後述する浄化剤又は活性剤を含む注入液を注入し、更に揚水井戸 22 から地下水を揚水することで発生する流れである。

[0020] (揚水井戸)

揚水井戸 22 は、地下土壌 10 から地下水を揚水する揚水手段であり、図示しないポンプ等により帯水層 12 の地下水を吸い上げて、浄化装置 30 に送ることができる。また、揚水井戸 22 は汚染土壌 E と遮水壁 28 との間に配置され、下端が不透水層 14 に到達するように地下土壌 10 に埋設されている。

[0021] 図 1 A においては図示の便宜上、2 本の揚水井戸 22 a、22 b のみを記載しているが、本開示の実施形態はこれに限らず、任意の本数を敷地の広さ等に応じて適宜配置して構わない。

[0022] なお、揚水井戸 22 は汚染土壌 E に配置されていてもよい。また、揚水井戸 22 による揚水の具体的な方法や、揚水井戸 22 の形状、サイズ等について

ては公知であるため、詳細な説明を省略する。

[0023] (注水井戸)

注水井戸 24 は、浄化装置 30 で生成された注入液を地下土壌 10 に注入する注入手段であり、図示しないポンプ等により注入液を地下土壌 10 内に送ることができる。また、注水井戸 24 は、汚染土壌 E と遮水壁 28 との間（すなわち汚染土壌 E からみて揚水井戸 22 の反対側）に配置された井戸であり、下端が不透水層 14 に到達するように地下土壌 10 に埋設されている。

[0024] 図 1 A においては図示の便宜上、2 つの注水井戸 24 a、24 b のみを記載しているが、本開示の実施形態はこれに限らず、任意の数を敷地の広さ等に応じて適宜配置して構わない。

[0025] なお、注水井戸 24 は汚染土壌 E に配置されていてもよい。また、注水井戸 24 による注入液の注入の具体的な方法や、注水井戸 24 の形状、サイズ等については公知であるため、詳細な説明を省略する。

[0026] (観測井戸)

観測井戸 26 は、地下の状態を観測する観測手段である。ここで、「地下の状態」とは、観測井戸 26 が埋設された位置における地下土壌 10 中の地下水の状態を示しており、例えば地下水位、地下水温度、地下水における浄化剤及び活性剤の濃度、地下水における汚染物質濃度などを含む。

[0027] 観測井戸 26 の内部には図示しない各種センサーが設置されている。これらのセンサーは、上述した地下水位、地下水温度、地下水における浄化剤及び活性剤の濃度、地下水における汚染物質濃度などを測定し、これらの測定値を浄化装置 30 における制御部 38 に電気信号で伝達する。

[0028] なお、これらのセンサーは揚水井戸 22 及び注水井戸 24 の内部にも設置されている。すなわち、揚水井戸 22 及び注水井戸 24 はそれぞれ、観測手段としても機能する。また、図 1 A、図 1 B においては、図が煩雑になる事を避けるため、各種センサーと制御部 38 とに接続された信号線の図示は省略している。

[0029] なお、観測井戸 26 は、遮水壁 28 で囲われた地下土壌内の複数箇所に埋設されている。図 1 A においては図示の便宜上、3 つの観測井戸 26 a、26 b、26 c のみを記載しているが、本開示の実施形態はこれに限らず、任意の数の観測井戸 26 を敷地の広さ等に応じて適宜配置することができる。

[0030] (遮水壁)

遮水壁 28 は、汚染土壌 E の周囲を囲むように地下土壌 10 に配置されたコンクリート製の遮水手段であり、遮水壁 28 内外の地下水の流れを遮断している。すなわち、遮水壁 28 の「外側」の地下土壌 10 における地下水の流れと、遮水壁 28 の「内側」の地下土壌 10 における地下水の流れとを、相互に影響を及ぼさないようにしている。

[0031] 図 1 B に示すように、遮水壁 28 の下端は不透水層 14 に根入れされている。これにより、汚染土壌 E は遮水壁 28 と不透水層 14 とで囲まれ、汚染物質が遮水壁 28 の外側の地下土壌 10 へ流出することが抑制されている。

[0032] (浄化装置)

浄化装置 30 は、揚水井戸から揚水された地下水を浄化し、後述する浄化剤や活性剤を添加して地下土壌 10 へ戻すための装置であり、水処理装置 32、加温装置 34、添加槽 36 及び制御部 38 を含んで構成される。

[0033] (水処理装置)

水処理装置 32 は、揚水井戸から揚水された地下水に空気を送り込み、揮発性汚染物質を揮発させて浄化する。

[0034] (加温装置)

加温装置 34 は、後述する制御部 38 により温調される図示しないヒーターにより、水処理装置 32 で浄化された地下水を加温する。加温装置 34 によって地下水を加温することにより、地下土壌 10 内で汚染物質を生物分解する分解微生物の増殖を促進したり、分解微生物の活性を上げたりすることができる。

[0035] (添加槽)

添加槽 36 は、地下水に対して浄化剤又は活性剤を添加して注入液を生成

する。具体的には、後述する制御部 38 により制御された投入装置（図示省略）から、添加槽 36 内部の地下水に、浄化剤又は活性剤が添加される。

[0036] ここで、「浄化剤」とは地下土壌 10 内で汚染物質を分解する物質のことであり、汚染物質を生物分解する分解微生物（例えばデハロコッコイデス）である。また、「活性剤」とは浄化剤の生物分解を活性化させる物質のことであり、一例として酵母エキスを使用している。

[0037] この浄化剤又は活性剤は、後述する制御部 38 により制御された投入装置（図示省略）により、添加槽 36 内部の地下水に添加され、添加槽 36 内部に設置された攪拌装置で攪拌することで、注水井戸 24 から地下土壌 10 へ注入する注入液が生成される。

[0038] （制御部）

制御部 38 は、観測井戸 26、注水井戸 24 及び揚水井戸 22 それぞれの内部に設置されたセンサーによって測定された地下水位、地下水温度、地下水における浄化剤又は活性剤の濃度、地下水における汚染物質濃度などの情報を、電気信号として受信する。そして受信した情報に応じて、水処理装置 32、加温装置 34、添加槽 36、揚水ポンプ P を駆動制御する。

[0039] （浄化方法）

第 1 実施形態に係る汚染土壌浄化システム 20 による汚染土壌 E の浄化方法について、図 2 に示したフローチャートを用いて説明する。

[0040] まず、ステップ 90 で、注水井戸 24 から地下土壌 10 へ注入液を「注入」する。具体的には、図 1 A、図 1 B に示した制御部 38 が添加槽 36 を制御して、添加槽 36 から注水井戸 24 へ、浄化剤又は活性剤が添加された注入液が注入される。注入液に対する浄化剤又は活性剤の添加量は、添加後の注入液における浄化剤又は活性剤の濃度が、地下土壌 10 において目標とする浄化剤又は活性剤の濃度になるように設定される。

[0041] 注水井戸 24 へ注入された注入液は、揚水ポンプ P が揚水井戸 22 から地下水を揚水して地下水の水勾配を生成することで、目標とする速度で注水井戸 24 から地下土壌 10 及び汚染土壌 E へ拡散する。

- [0042] 次に、ステップS 1 0 0で、「濃度測定」を行う。具体的には、観測井戸2 6の内部に設置されたセンサーが、地下水における浄化剤又は活性剤の濃度を測定する。
- [0043] 次に、ステップS 1 1 0で、「濃度判定」を行う。この濃度判定では、ステップ1 0 0で計測された観測井戸2 6の地下水における浄化剤又は活性剤の実測濃度が目標濃度に達しているかどうかを、制御部3 8が判定する。
- [0044] 実測濃度が目標濃度に達している場合、ステップS 1 0 0に戻り再度濃度を測定し、ステップS 1 1 0へ進んで目標濃度が維持されているかどうかを制御部3 8が判定する。このように、実測濃度が目標濃度を維持するように、濃度測定と濃度判定とを繰り返す。実測濃度が目標濃度に達していない場合、ステップS 1 1 8に進む。
- [0045] ステップS 1 1 8では、「揚水量調整」を行う。この揚水量調整では、制御部3 8が揚水ポンプPを制御して、揚水井戸2 2における地下水の揚水力を上げる。これにより浄化剤又は活性剤の汚染土壌Eへの浸透力を調整して、実測濃度を目標濃度に近づける。
- [0046] 実測濃度が目標濃度に達したかどうかは、ステップS 1 0 0に戻り再度濃度を測定し、ステップS 1 1 0に進んで再度制御部3 8によって判定される。
- [0047] 以上のステップを繰り返すことで、汚染土壌Eの地下水における浄化剤又は活性剤の濃度が目標濃度に維持され、汚染土壌Eの汚染物質が次第に除去される。
- [0048] なお、本明細書において「揚水量」、「注入量」の用語は、それぞれ特に断りが無い限り、浄化装置3 0と地下土壌1 0との間を移動する単位時間当たりの地下水、注入液の「体積（又は流量）」を示しているものとする。また、「添加量」は、注入液の単位容積当たりに添加される浄化剤又は活性剤の「重量」で示されるものとする。さらに、「濃度」は「重量濃度」で示されるものとする。なお、添加量及び濃度は、それぞれ体積及び体積濃度で示してもよい。

[0049] (作用・効果)

第1実施形態に係る汚染土壌浄化システム20では、ステップS100で濃度測定を行い、ステップS110で濃度判定を行う。さらに、ステップS118で揚水量調整を行う。これにより、人の手を介さずにタイムリーに地下土壌10の地下水における浄化剤又は活性剤の濃度を調整し、汚染土壌を効率的に浄化することができる。

[0050] なお、本実施形態においては、ステップS100で「観測井戸26」の地下水における浄化剤又は活性剤の濃度を測定したが、本開示の実施形態はこれに限らない。例えばステップS100では、「揚水井戸22」の地下水における浄化剤又は活性剤の濃度を測定してもよい。以下に説明する各実施形態についても同様である。

[0051] この場合、ステップS110では、揚水井戸22の地下水における浄化剤又は活性剤の実測濃度が、目標濃度に達したかどうかを判定し、その判定結果に基づきステップS118で揚水量調整を行う。

[0052] また、本実施形態においては、ステップS118で「揚水量調整」を行うものとしたが、本開示の実施形態はこれに限らない。例えば揚水量調整に代えて、注入液における浄化剤又は活性剤の濃度を調整する「濃度調整」を行ってもよい。この濃度調整においては、添加槽36における地下水への浄化剤又は活性剤の添加量を制御して、注入液における浄化剤又は活性剤の濃度を調整する。これにより、観測井戸26内の地下水における実測濃度が目標濃度に近づくようにする。

[0053] [第2実施形態]

第2実施形態に係る汚染土壌浄化システムは、第1実施形態に係る汚染土壌浄化システム20の構成及び浄化方法に加えて、以下に説明する管理関数を用いて、地下土壌10の地下水における浄化剤又は活性剤の濃度が目標濃度に到達する時間を予測する。

[0054] (管理関数)

図3には、地下土壌10に注入液の注入を開始してからの経過時間 t と、

観測井戸 26 の地下水における予測濃度 C との関係を示す管理関数 $f(t)$ が実線で示されている。例えば時間 t_1 における予測濃度は予測濃度 C_1 とされている。

[0055] この管理関数 $f(t)$ は、数式を用いて次のように表される。

[0056] $f(t) = (A - D) \div [1 + (B/t)^G] + D \cdots \cdots$
・ (1 式)

A : 注入液における浄化剤又は活性剤の濃度

B : 地下土壌の土壌物性 X によって決まる定数

G : 地下土壌の土壌物性 Y によって決まる定数

D : 注入液を注入する前の地下水における浄化剤又は活性剤の濃度

t : 注入液の注入を開始してからの経過時間

[0057] この (1 式) における定数 B、G は、地下土壌の土壌物性 X 、 Y によって決まる定数であり、汚染土壌 E の浄化に先立って実施する土壌調査によって決定される。定数 B、G を決定するために用いる土壌調査の内容としては、例えば地下土壌の透水係数、土壌粒度等が挙げられる。

[0058] (作用・効果)

第 2 実施形態に係る汚染土壌浄化システムでは、(1 式) で示される管理関数 $f(t)$ を用いることで、図 2 のステップ S90 において注水井戸 24 へ注入される注入液における浄化剤又は活性剤の濃度 A と、注入液を注入する前の観測井戸 26 の地下水における浄化剤又は活性剤の濃度 D と、地下土壌の土壌物性によって決まる定数 B、G と、地下土壌 10 に注入液の注入を開始してからの経過時間 t と、に基づいて、観測井戸 26 の地下水における予測濃度が算出される。

[0059] これにより、観測井戸 26 の地下水における浄化剤又は活性剤の濃度が図 3 に示す目標濃度 C_E に到達する時間 t_E を予測することができる。

[0060] また、時間 t_E が経過するまでに、地下水における浄化剤又は活性剤の濃度を目標濃度 C_E に到達させるためには、注入液における浄化剤又は活性剤の濃度 A をどの程度に設定するべきか (すなわち注入液に浄化剤又は活性剤

をどの程度添加すればよいか)を算出することができる。

- [0061] このため、汚染土壌Eを浄化するために必要な資源量、エネルギー、時間などを予め見積もり易く、事業計画を立てやすい。
- [0062] なお、管理関数は、地下土壌10に注入液の注入を開始してからの経過時間に対する観測井戸26の地下水の「温度」についても同様に設定することが可能である。
- [0063] この場合、(1式)における濃度A、Dはそれぞれ、注入液の温度、注入液を注入する前の地下水の温度に置き換えられる。また、定数B、Gを決定するために用いる調査結果としては、地下土壌の比熱や熱伝導性が挙げられる。さらに、図3の縦軸は温度に置き換えられる。
- [0064] 「温度」を管理する管理関数を用いることで、図2のステップS90において注水井戸24へ注入される注入液の温度Aと、注入液を注入する前の観測井戸26の地下水の温度Dと、地下土壌の土壌物性によって決まる定数B、Gと、地下土壌10に注入液の注入を開始してからの経過時間tと、に基づいて、観測井戸26の地下水の予測温度が算出される。
- [0065] これにより、観測井戸26の地下水温度が目標温度に達する時間を予測することができる。また、所定の時間が経過するまでに、地下水の温度を目標温度に到達させるためには、注入液をどの程度加温すればよいかを算出することができる。地下水の目標温度を定め、注入液の加温量を調整することで、地下水の温度を、分解微生物の活性が高い温度に保つことができる。
- [0066] なお、本明細書では、これらの「濃度」又は「温度」を管理する管理関数を総称して単に管理関数と称することがあり、管理関数は、「濃度」、「温度」の何れか又は双方について設定することができる。以下の各実施形態においても同様である。
- [0067] また、本実施形態において管理関数は、観測井戸26の地下水濃度が目標濃度に達する時間を予測するものとしたが、本開示の実施形態はこれに限らず、揚水井戸22の地下水濃度が目標濃度に達する時間を予測することもできる。あるいは、観測井戸26と揚水井戸22の双方について地下水濃度が

目標濃度に達する時間を予測することもできる。以下の各実施形態においても同様である。

[0068] このように、管理関数は地下土壌 10 における特定箇所（例えば観測井戸 26 のある場所、揚水井戸 22 のある場所）における地下水の浄化剤又は活性剤の予測濃度を示しているものであり、地下土壌 10 全体の状態を示すものではない。

[0069] このため、地下土壌 10 の汚染状況が均一でない場合や地下水の流れが均一でない場合等は、汚染状況や地下水の状況が異なる場所ごとに、それぞれの状況に応じた異なる管理関数を用いて、地下水の浄化剤又は活性剤の濃度を予測することができる。

[0070] 例えば図 9 には、地下土壌 10 に 2 つの汚染土壌 E a、E b が形成されている状態が示されている。これらの汚染土壌 E a、E b は汚染物質の濃度が異なるため、汚染物質を浄化するための最適な注入液の温度や、注入液に添加する最適な浄化剤又は活性剤の濃度も異なる。

[0071] このような場合に、例えば図 9 に示す揚水井戸 22 a、注水井戸 24 a 及び観測井戸 26 a を備え汚染土壌 E a を浄化する注揚水系統と、揚水井戸 22 b、注水井戸 24 b 及び観測井戸 26 b を備え汚染土壌 E b を浄化する注揚水系統と、のそれぞれにおいて、図 10 に示すように、汚染土壌 E a、E b ごとにそれぞれ最適化された管理関数 $f_a(t)$ 、 $f_b(t)$ を設定できる。

[0072] なお、各注揚水系統に含まれる揚水井戸、注水井戸、観測井戸の数は、図 9 においては便宜的に 1 本ずつ示しているが、これらは複数設けてもよい。このように、地下土壌 10 において複数の管理関数を設定する実施形態については、以下に示す各実施形態においても適用できる。

[0073] [第 3 実施形態]

第 3 実施形態に係る汚染土壌浄化システムは、第 2 実施形態に係る汚染土壌浄化システムと同様、管理関数を用いて地下水における浄化剤又は活性剤の濃度が目標濃度に達する時間を予測し、さらに、管理関数により算出され

た予測濃度と実測濃度とを比較して、管理関数を補正する。

- [0074] 第3実施形態に係る汚染土壌浄化システムによる汚染土壌Eの浄化方法について、図4に示したフローチャート及び図5に示したグラフを用いて説明する。なお、第1実施形態、第2実施形態と同様の内容については適宜説明を省略する。
- [0075] 第3実施形態の浄化方法では、まず、図4に示したステップS90-2において、添加槽36から注水井戸24へ、浄化剤又は活性剤が添加された注入液が注入される。
- [0076] ここで上述した管理関数を用いることで、この注入液における浄化剤又は活性剤の濃度と、注入液を注入する前の観測井戸26の地下水における浄化剤又は活性剤の濃度と、地下土壌の土壌物性と、地下土壌10に注入液の注入を開始してからの経過時間 t と、に基づいて、観測井戸26の地下水における予測濃度が算出される。図5においては、例えば経過時間 t_1 における予測濃度は C_1 とされている。
- [0077] なお、ステップ90-2において添加槽36で生成される注入液の濃度は、後述する目標濃度域CEの上限濃度 C_3 に調整される。
- [0078] 次のステップS100-2の「濃度測定」については第1実施形態におけるステップS100と同様であり説明は省略する。
- [0079] 次に、ステップS110-2で「濃度判定」を行う。この濃度判定では、制御部38が、ステップ100-2で計測された観測井戸26の地下水における浄化剤又は活性剤の実測濃度と、管理関数により予測された観測井戸26の地下水における浄化剤又は活性剤の予測濃度とを比較し、予測濃度から実測濃度を引いた差が、予め設定された許容値以下かどうかを判定する。
- [0080] 予測濃度から実測濃度を引いた差が許容値以下の場合、ステップS114に進む。許容値よりも大きい場合、ステップS118-2に進む。
- [0081] ステップS118-2では「揚水量調整」を行う。この揚水量調整では、制御部38が揚水ポンプPを制御して、揚水井戸22における揚水量を調整する。これにより地下水の水勾配を変えて、浄化剤又は活性剤の汚染土壌E

への浸透力を調整する。

- [0082] 予測濃度から実測濃度を引いた差が許容値以内になったかどうかは、ステップS 1 0 0－2へ戻り、地下水における浄化剤又は活性剤の濃度をセンサーが測定し、ステップS 1 1 0－2に進んで、制御部3 8が予測濃度と実測濃度とを比較することで判断される。予測濃度と実測濃度との差が許容値以下の場合、ステップS 1 1 4に進む。
- [0083] ステップS 1 1 4では、「収束値判定」を行う。この収束値判定では、ステップ1 0 0－2で計測された実測濃度が、所定の目標濃度域に到達する前に上げ止まっているかどうかを、制御部3 8が判定する。「目標濃度域」とは、汚染土壌Eを最も効率よく浄化することができる浄化剤又は活性剤の濃度域であり、汚染土壌Eの浄化に先立って実施する土壌調査により予め設定される。
- [0084] 「実測濃度が上げ止まっている」とは、図5の時間t 4に示すように、単位時間あたりの実測濃度の上昇幅（すなわち後述する実測濃度曲線F（t）の傾き）が、目標濃度域C Eの下限濃度C 2に到達する前にゼロに近づき（すなわち予め設定された所定値未満で上げ止まっており）、地下水における浄化剤又は活性剤の濃度が目標濃度域C Eに到達する見込みが得られない、あるいは到達するのに想定以上の時間を要する状態のことを指す。
- [0085] 実測濃度が目標濃度域に到達する前に上げ止まることなく上昇を続けている場合、ステップS 1 0 0－2に戻り、ステップS 1 1 0－2、S 1 1 4を繰り返す。実測濃度が、目標濃度域に到達せず上げ止まっている場合、ステップS 1 2 4に進む。
- [0086] ステップS 1 2 4では、「濃度調整」を行う。この濃度調整においては、添加槽3 6における地下水への浄化剤又は活性剤の添加量を制御して、注入液における浄化剤又は活性剤の濃度を高くする。これにより、観測井戸2 6内の地下水における実測濃度が目標濃度域C Eに近づけて、実測濃度の上げ止まりを解消する。
- [0087] 次に、ステップS 1 2 5で管理関数を補正（管理関数の補正方法について

は後述する) し、ステップ S 1 0 0 - 2 に戻りステップ S 1 1 4 に進んで、単位時間あたりの実測濃度の上昇幅が所定値以上になったかどうかを確認する。これにより、実測濃度の上げ止まりが解消されたかどうか判断される。

[0088] (管理関数の補正)

図 5 には、観測井戸 2 6 の内部に設置されたセンサーで測定された観測井戸 2 6 内の地下水における浄化剤又は活性剤の実測濃度を、注水井戸 2 4 から注入液の注入を開始してからの経過時間毎にプロットし、そのプロットした点に沿って近似的に生成された曲線が、実測濃度曲線 $F(t)$ として破線で示されている。

[0089] 上述したステップ S 1 1 4 (図 5 の時間 t_4) に示されるように、実測濃度が目標濃度域に到達せず上げ止まっている場合、管理関数 $f(t)$ と実測濃度曲線 $F(t)$ とが乖離しており、管理関数 $f(t)$ における時間 t_4 以降の予測濃度の信頼性が低い。このような場合、予測濃度が実測濃度と近似するように、管理関数を補正する。

[0090] 図 5 に示された管理関数 $g(t)$ は、管理関数 $f(t)$ を補正したものである。管理関数 $f(t)$ の補正方法は、(1 式)における濃度 A を、ステップ S 1 2 4 で調整された調整後の濃度に置き換え、(1 式)における濃度 D を、濃度 A を補正した時点(時間 t_4)での地下水における浄化剤又は活性剤の濃度 C₄ に置き換える。そして、図 3 に矢印 N で示したように、時間 t_4 以降は、管理関数 $g(t)$ に基づいて地下水における浄化剤又は活性剤の濃度を予測する。

[0091] なお、上述したとおり、管理関数は、地下土壌 1 0 に注入液の注入を開始してからの経過時間に対する地下水の「温度」についても同様に設定することが可能である。

[0092] この場合、ステップ S 1 0 0 - 2 では、「濃度測定」に代えて「温度測定」を行う。具体的には、観測井戸 2 6 の内部に設置されたセンサーが、地下水の温度を測定する。

- [0093] また、ステップS 1 1 0－2では、「濃度判定」に代えて「温度判定」を行う。具体的には、制御部3 8が、ステップ1 0 0－2で計測された観測井戸2 6の地下水の実測温度と、管理関数により予測された観測井戸2 6の地下水の予測温度とを比較し、実測温度が所定の範囲内かどうかを判定する。より具体的には、予測温度から実測温度を引いた差が、予め設定された許容値以内かどうかを判定する。
- [0094] また、ステップS 1 1 8－2の「揚水量調整」では、地下水よりも高温である注入液の汚染土壌Eへの浸透力を調整する。
- [0095] また、ステップS 1 1 4の「収束値判定」では、ステップ1 0 0－2で計測された実測温度が、所定の目標温度域に到達する前に上げ止まっていないかどうかを、制御部3 8が判定する。目標温度域は、汚染土壌Eを最も効率よく浄化することができる地下水の温度域（すなわち分解微生物が死滅せず、活性が最も高くなる温度域）であり、汚染土壌Eの浄化に先立って実施する土壌調査により予め設定される。
- [0096] また、ステップS 1 2 4では、「濃度調整」に代えて「温度調整」を行う。この温度調整においては、制御部3 8が、加温装置3 4の出力を制御して、注入液の温度を高くする。これにより、観測井戸2 6内の地下水における実測温度が目標温度域C Eに近づくようにする。
- [0097] なお、地下水における浄化剤又は活性剤の「濃度」を予測する管理関数と、地下水の「温度」を予測する管理関数は、何れか一方だけではなく、双方を用いてもよい。
- [0098] この場合、ステップS 1 0 0－2では「濃度測定」及び「温度測定」を行い、ステップS 1 1 0－2では「濃度判定」及び「温度判定」を行い実測濃度及び実測温度の少なくとも一方が予め設定された許容値外と判定された場合は、ステップS 1 1 8－2で「揚水量調整」を行う。また、ステップS 1 1 4の「収束値判定」では実測濃度及び実測温度の上げ止まりを判定し実測濃度及び実測温度及び実測温度の少なくとも一方が上げ止まっていると判定された場合は、ステップS 1 2 4で「濃度調整」及び「温度調整」の少なく

とも一方（すなわちステップS 1 1 4で上げ止まっていると判断されたものの調整）を行う。さらにステップS 1 2 5では、「地下水における浄化剤又は活性剤の濃度を予測する管理関数」と「地下水の温度を予測する管理関数」のうち少なくとも一方（すなわちステップS 1 2 4で濃度及び温度を調整したものに關する管理関数）を補正する。

[0099] （作用・効果）

第3実施形態に係る汚染土壌浄化システムでは、管理関数の予測値と実測値とのずれに応じて、管理関数を補正する。

[0100] これにより、管理関数の予測精度を高めることができる。このため、地下土壌に過剰な濃度の浄化剤又は活性剤を含んだ注入液を注入したり、注入液を加温しすぎることを抑制できる。したがって、資源やエネルギーの無駄を削減できる。また、注入液に含まれる浄化剤又は活性剤の量が不足したり、注入液の温度が不足する事を抑制できる。したがって、土壌浄化能力を維持することができる。

[0101] [第4実施形態]

第4実施形態においては、図6に示すように、ステップS 1 1 4において、実測濃度が目標濃度域に到達する前に上げ止まることなく上昇を続けている場合、ステップS 1 0 0－2に戻らずに、ステップS 1 2 0に進む。

[0102] ステップS 1 2 0以降のステップでは、汚染土壌浄化システムの稼働を自動停止、自動再開して、地下水における浄化剤又は活性剤の濃度を目標濃度域に保持する。

[0103] 具体的に説明すると、まずステップS 1 2 0では、「上限値判定」を行う。この上限値判定では、実測濃度が、予め設定された上限値に達したかどうかを判定する。予め設定する上限値は、例えば図7に示すように、目標濃度域C Eの上限濃度C 3等とする。

[0104] 実測濃度が上限濃度C 3に達していない場合、ステップS 1 0 0－2に戻る。図7の時間t 3における実測濃度曲線F（t）が示すように、実測濃度が上限濃度C 3に達した場合、ステップS 1 2 8に進む。

- [0105] ステップS 1 2 8では、添加槽3 6のポンプ及び揚水ポンプPを制御して、注水井戸2 4から地下土壌1 0への注入液の注入及び揚水井戸2 2からの地下水の揚水を停止する。
- [0106] 次に、ステップS 1 3 0で「濃度測定」を行う。具体的には、観測井戸2 6の内部に設置されたセンサーが、観測井戸2 6の地下水における浄化剤又は活性剤の濃度を測定する。
- [0107] 次に、ステップS 1 3 2で「下限値判定」を行う。この下限値判定では、ステップS 1 2 8において注入液の注入を停止したことにより減少する地下水中の浄化剤又は活性剤の濃度が、予め設定された下限値に達したかどうかを、制御部3 8が判定する。この下限値は、図7における目標濃度域C Eの下限濃度C 2とされている。
- [0108] 地下水における浄化剤又は活性剤の濃度が、下限濃度C 2に達していない（すなわちC 2まで下がっていない）場合、ステップS 1 3 0に戻る。すなわち、地下水の浄化剤又は活性剤の濃度が、下限濃度C 2に達するまで計測と判定を繰り返す。図7の時間t 2に示すように、地下水の浄化剤又は活性剤の濃度が、下限濃度C 2に達した場合、ステップS 1 3 6に進む。
- [0109] ステップS 1 3 6では、制御部3 8が添加槽3 6及び揚水ポンプPを制御して、注水井戸2 4から地下土壌1 0への注入液の注入及び揚水井戸2 2からの地下水の揚水を再開する。
- [0110] なお、ステップS 1 2 8において注入液の注入を停止してからステップS 1 3 6で再開するまでの間、管理関数による濃度予測は行わない。具体的には、図7に示すように、実測濃度が目標濃度域C Eの上限濃度C 3に達した時間t 3から（すなわち注入液の注入を停止してから）、実測濃度が下限濃度C 2に達する時間t 2まで（すなわち注入液の注入を再開するまで）の期間は、管理関数による濃度予測は行わない。
- [0111] そして、ステップS 1 3 6において注入液の注入を開始してからは、ステップS 1 3 7で管理関数を補正し、新たな管理関数 $h(t)$ を用いて濃度を予測する。管理関数 $h(t)$ は、(1式)における濃度Aの値を、下限濃度

C 2 よりも大きな任意の値とし、(1 式)における濃度 D の値を、ステップ S 1 3 6 において注入液の注入を開始する時点での濃度(すなわち下限濃度) C 2 に設定する。

[0112] なお、ステップ S 1 2 0 の「上限値判定」、ステップ S 1 3 0 の「濃度測定」、ステップ S 1 3 2 の「下限値判定」、ステップ S 1 3 7 の「管理関数補正」は、それぞれ濃度に代えて温度についても行うことができる。あるいは、濃度、温度の双方について行うことができる。これらのステップを濃度、温度の双方について行う場合は、ステップ S 1 2 0 の「上限値判定」で実測濃度、温度の「双方」が上限濃度、温度に達したと判断された場合に、ステップ S 1 2 8 で注入液の注入を停止する。また、ステップ S 1 3 2 で実測濃度、温度の「少なくとも一方」が下限濃度、温度に達したと判断された場合に、ステップ S 1 3 6 で注入液の注入を再開する。

[0113] (作用・効果)

第 4 実施形態に係る汚染土壌浄化システムでは、観測井戸 2 6 の内部に設置されたセンサーが測定した地下水における浄化剤又は活性剤の濃度に基づき、制御部 3 8 が地下土壌 1 0 への注入液の注入を停止及び再開する。

[0114] これにより、地下土壌 1 0 における浄化剤又は活性剤の濃度を目標濃度域 C E に維持することができる。このため、地下土壌 1 0 における浄化剤又は活性剤の濃度が不足したり、過剰になることを抑制できる。

[0115] [変形例]

第 1 実施形態～第 4 実施形態に係る汚染土壌浄化システムの各種変形例について説明する。

[0116] 第 1 実施形態においては、図 8 に示すようにステップ S 1 0 0 と S 1 1 0 の間にステップ S 1 0 2 及び S 1 0 8 を介在させてもよい。

[0117] このステップ S 1 0 2 では例えば「水位判定」を行う。この水位判定では、注入液が注入された注水井戸 2 4 の「水位」が上限値以下かどうかを判定する。なお、水位の上限値は、注水井戸 2 4 へ注入液を注入し続けた場合に、注水井戸 2 4 から地下水がオーバーフローする虞のある水位である。

- [0118] 注水井戸 24 の水位が上限値よりも大きい場合、ステップ S 108 において「水位調整」を行う。この水位調整では、注水井戸 24 から地下水を吸い上げて注水井戸 24 を洗浄して詰まりを除去し、注水井戸 24 から汚染土壌 E へ注入液を流れ易くする。
- [0119] なお、図 8 にはステップ S 102、S 108 として「水位判定」、「水位調整」を示しているが、本開示の実施形態はこれに限らない。例えばステップ S 102 では「注入濃度判定」を行ってもよい。この注入濃度判定では、添加槽 36 で生成された注入液における浄化剤又は活性剤の濃度が上限値以下かどうかを判定する。なお、濃度の上限値は水溶液における分解微生物の飽和濃度のことである。
- [0120] 注入液における浄化剤又は活性剤の濃度が上限値よりも大きい場合は、ステップ S 108 において「添加量調整」を行う。この添加量調整では、添加槽 36 での注入液への浄化剤又は活性剤の添加量を減らす。これにより、浄化剤又は活性剤の無駄を抑制する。
- [0121] また、ステップ S 102 では例えば「注入温度判定」を行ってもよい。この注入温度判定では、添加槽 36 の注入液の温度が上限値以下かつ下限値以上かどうかを判定する。
- [0122] 注入液の温度が上限値よりも大きい場合は、ステップ S 108 において「加温調整」を行う。この加温調整では、加温装置 34 での加温量を減らし、分解微生物の死滅を抑制する。注入液の温度が下限値よりも小さい場合は、ステップ S 108 において加温装置 34 での加温量を増やし、分解微生物が浄化機能を発揮するために必要な温度を維持する。
- [0123] また、ステップ S 102 では例えば「揚水量判定」を行ってもよい。この揚水量判定では、揚水井戸 22 の水位の測定値から、揚水量が上限値以下かつ下限値以上かどうかを判定する。
- [0124] 揚水量が上限値よりも大きい場合は、ステップ S 108 において「ポンプ調整」を行う。このポンプ調整では、揚水井戸 22 から地下水を揚水する揚水ポンプ P の出力を下げ、揚水ポンプ P の故障を防ぐ。揚水量が下限値より

も小さい場合は、ステップS 1 0 8において揚水ポンプPの出力を上げ、注水井戸2 4における注入液の注入量を下回らないようにする。

[0125] また、ステップS 1 0 2では例えば「流動判定」を行ってもよい。この流動判定では、揚水井戸2 2、注水井戸2 4、観測井戸2 6におけるそれぞれの水位から、地下土壌1 0における地下水の流れが想定した流れになっているかどうかを判定する。

[0126] なお、「地下水の流れが想定した流れになっているかどうか」は、注水井戸2 4、揚水井戸2 2及び観測井戸2 6相互の水位差が想定範囲内かどうかで判断される。水位差が大きい場合、地下土壌1 0における水勾配が大きく、想定した流れよりも地下水の流れが過剰である。また水位差が小さい場合、地下土壌1 0における水勾配が小さく、想定した流れよりも地下水の流れが少ない。

[0127] 地下水の流れが想定した流れになっていない場合、ステップS 1 0 8で「流量調整」を行う。この流量調整では、地下水の流れが想定した流れになるように、揚水井戸2 2における揚水量、注水井戸2 4における注入量の少なくとも一方を調整する。例えば注水井戸2 4の水位に対して揚水井戸2 2の水位が想定よりも高い（すなわち水位差が小さい）場合、揚水ポンプPの出力を大きくして、揚水井戸2 2からの揚水量を多くする。

[0128] なお、本実施形態においては、遮水壁2 8の下端は不透水層1 4に根入れされており、遮水壁2 8内外の地下水の流れを遮断している。このため、例えば揚水量を大きくすることで地下水の流れを調整できる一方で、遮水壁2 8の外側から地下水が供給されないため、地下水位は低下する。このような場合は、揚水量に加え注水量も大きくすることで、地下水位を適切な高さに維持することができる。

[0129] 以上説明したステップS 1 0 2の実施例である「水位判定」、「注入濃度判定」、「注入温度判定」、「揚水量判定」、「流動判定」は組み合わせて用いることができる。なお、これらのステップ1 0 2を適用する場合は、ステップ1 0 0において、それぞれ「注水井戸2 4の水位」、「添加槽3 6の

注入液における浄化剤又は活性剤の濃度」、「添加槽 3 6 の注入液の温度」、「揚水井戸 2 2 の水位」、「揚水井戸 2 2、注水井戸 2 4、観測井戸 2 6 の水位」を測定する。

[0130] また、ステップ S 1 0 2 は、第 2 ～第 4 実施形態における汚染土壌浄化方法においても任意のタイミングで行うことができる。

[0131] また、第 1 ～第 4 実施形態においては、図 1 A、図 1 B に示す遮水壁 2 8 の材質をコンクリートとしているが、本開示の実施形態はこれに限らない。例えば凍土、粘土、鋼製矢板、セメント改良体等を用いることができる。また、遮水壁 2 8 は必ずしも設ける必要はない。遮水壁 2 8 を設けない場合は、地下水の流れの上流側に注水井戸 2 4 を配置し、下流側に揚水井戸 2 2 を設置することが望ましい。これにより、注水井戸 2 4 から地下土壌 1 0 に注入した注入液を円滑に地下土壌 1 0 へ浸透させることができる。

[0132] また、第 1 ～第 4 実施形態においては、図 1 A、図 1 B に示す水処理装置 3 2 において、地下水に空気を送り込むことで水質改善するものとしたが、本開示の実施形態はこれに限らない。例えば水質改善の方法として、地下水に浄化剤を添加し反応させて水質改善する方法、地下水に含まれる汚染物質を吸着することで地下水と汚染物質との分離を図る方法などを用いてもよい。

[0133] 浄化剤として汚染物質を生物分解する分解微生物を用いて地下水を浄化する場合には、栄養塩や酸素を混入したり、新たに分解微生物を混入したりしても良い。さらに、注水井戸 2 4 による注入液の注入を円滑に実施するため、凝集剤を混入したりしても良い。

[0134] また、第 1 ～第 4 実施形態においては、ヒーターにより水処理装置 3 2 で浄化された地下水を加温するものとしたが、本開示の実施形態はこれに限らない。例えば空調機器（図示省略）の熱媒体と、水処理装置 3 2 で浄化された地下水とを熱交換させることにより地下水を加温しても良い。

[0135] また、第 1 ～第 4 実施形態においては浄化剤として分解微生物を用いているが、本開示の実施形態はこれに限らない。例えば汚染物質を化学分解する

過酸化水素、鉄系スラリー、加硫酸塩、フェントン試薬、過マンガン酸、過炭酸塩などの化学分解剤などとしてもよい。

[0136] また、第1～第4実施形態においては活性剤として酵母エキスをを用いているが、本開示の実施形態はこれに限らない。例えば、水素徐放剤（例えばポリ乳酸エステル）、高脂肪酸エステル、ラクトース等としてもよい。

[0137] なお、浄化剤と活性剤とは、それぞれ単独で注入液に添加してもよいし、組み合わせて添加してもよい。また、複数種類の浄化剤を注入液に添加することもできるし、複数種類の活性剤を注入液に添加することもできる。さらに、浄化剤、活性剤に加えて、地下水中での浄化剤や添加剤の濃度を測定しやすくするために、任意のトレーサー物質を添加してもよい。このように、本開示に係る汚染土壌浄化システムにおいては、各種の実施形態を組み合わせることができる。

[0138] 2016年8月31日に出願された日本国特許出願2016-170144号の開示は、その全体が参照により本明細書に取り込まれる。本明細書に記載されたすべての文献、特許出願、および技術規格は、個々の文献、特許出願、および技術規格が参照により取り込まれることが具体的かつ個々に記された場合と同程度に、本明細書中に参照により取り込まれる。