

臭化メチルを巡る現状と代替技術

野菜茶業研究所 西 和文

臭化メチルの動向

2005 年に入り、臭化メチル問題は新しい段階に入った。「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書締約国会合」の決議により、日本、アメリカ、EU などの先進諸国は、検疫用途や不可欠用途など国際的に承認された用途以外での臭化メチルの消費（ここでいう消費量とは、生産＋輸入－輸出を意味する）ができなくなる規制の最終段階に入った。すでに 20 カ国が不可欠用途申請を行っており、日本もクリシギゾウムシやメロン、スイカ、キュウリ、トウガラシ類の土壤伝染性ウイルス病、ショウガ根茎腐敗病を対象として、3 回の不可欠用途申請を行ってきた。2005 年分の不可欠用途については、国連環境計画（UNEP）技術経済評価パネル（TEAP）とその下部委員会である臭化メチル技術選択肢委員会（MBTOC）での審査結果を受けて、第 15 回および第 16 回の締約国会合（MOP）ですでに承認されており、先進国全体で 16,009.523 トン（うち日本分は 748 トン）が認められているところである。2006 年の不可欠用途については、16MOP と第 2 回特別会合で一部承認されている（12,596.737 トン、うち日本分は 656.1 トン）ほか、今年 12 月に開催されることとなっている 17MOP で、追加承認がある見込み（日本分の追加申請量 85.3 トンは承認される見込み）である。2007 年分の不可欠用途については、MBTOC での審査が終わり、その結果はまもなく公表される予定であるが、日本からの申請分のほとんどは承認

表 1 日本からの不可欠用途申請と審査結果

作物名	対象病虫害	2005 年使用分		2006 年使用分			2007 年使用分	
		申請	承認	申請	承認	見込*	申請	見込*
クリ	クリシギゾウムシ	7.1	7.1	6.8	6.5	0.3	6.5	6.5
キュウリ	緑斑モザイク病	88.3	88.3	88.8	87.6	1.2	72.4	72.4
ショウガ	根茎腐敗病	142.3	142.3	142.3	142.3	-	127.0	-
メロン	モザイク病 えそ斑点病	194.1	194.1	203.9	171.6	32.3	182.2	182.2
スイカ	緑斑モザイク病	129.0	129.0	98.9	60.9	38.0	94.2	94.2
トウガラシ類	モザイク病	187.2	187.2	200.7	187.2	13.5	169.4	156.695
合計		748.0	748.0	741.4	656.1	85.3	651.7	511.975

*：審査途上であるが、「May 2005 TEAP Teport」に Recommend として評価されているもの
単位：トン。

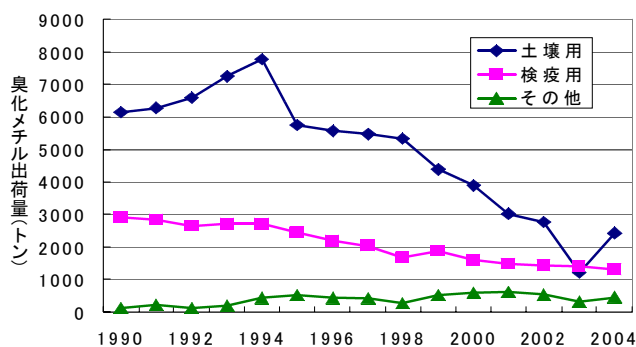


図1 わが国における臭化メチル出荷量の推移 (農林水産省植物防疫課の資料をもとに作成)

される見込みである。表1に、日本からの申請数量と承認および承認見込み数量を、図1にわが国における臭化メチルの用途別生産量の推移を、図2には不可欠用途決定までの仕組みを示した。

これまでの不可欠用途申請では、結果的には日本からの申請はすべて承認されている。しかしその審査過程では、土壌伝染性ウイルス病でも土壌消毒以外の方法で防除を進めれば

臭化メチルの消費量を削減できるという意見が出されたり、ショウガの根茎腐敗病に対しては代替技術があるとの見解が示されるなど、簡単に承認が得られたわけではない。今後の不可欠用途申請でも、技術的あるいは経済的視点からの対応技術の有無が論議の対象になる。同時に、共通の審査基準（この基準の適用を免れるためには、基準が不都合であることを申請国は実証する必要がある）を設けることによる薬量の削減が現在の課題として提起されている。この基準は、①臭化メチルの処理量は寒冷地粘土質土壌で最大 45g/m²、砂質土壌で 35g/m²、構造物の処理では最大 20g/m³、収穫物処理ではヨーロッパ植物防疫機構（EPPO）の基準とする、②難透過性フィルムまたは低透過性フィルムを使用する、③土壌病原菌対策用には、臭化メチルとクロルピクリンの混合比 50:50 のものを標準とする、④ Nutgrass など難防除雑草対策用には、臭化メチルとクロルピクリンの混合比 67:33 のものを標準とする、⑤圃場の全面処理でなく、畦処理を原則とする、といったことからなっている。この基準が合意されれば、基準に合致しない申請には、それなりのペナルティーが課される。例えば全面処理の申請に対しては承認数量は 33%カットされ、難透過性フィルムまたは低透過性フィルムを使用していない場合には、最大 25%のカットということになる。この基準はまだ完全に合意されているわけではなく、また導入は段階的に進むと考えられるが、審査が厳しくなるであろうことには疑いの余地はない。また EC 委員会は、不可欠用途枠の段階的削減を提起している。すでに域内各国の申請に対しては事前チェックし、申請数量を大幅に減少させている。また MOP の承認量の一部を返上させもしている。このように、不可欠用途枠の縮小に向けた取り組みは、一層強化される情勢である。

不可欠用途として承認された臭化メチルは、不可欠用途申請を行った農家が申請内容に従ってのみ、使用できる。不可欠用途専用臭化メチル購入の手続は図3に示す通りで、購入にあたっては各都道府県から申請を行った農家あてに出された審査結果通知書を提示す

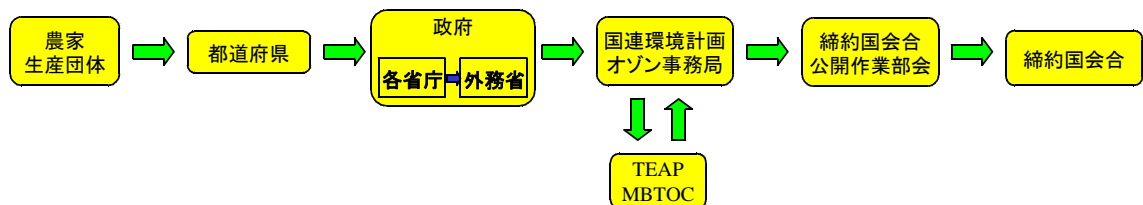


図2 不可欠用途決定までのプロセス

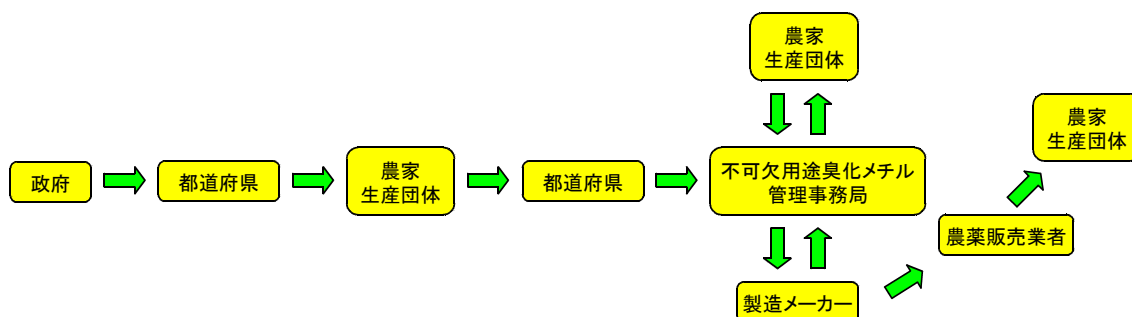


図3 不可欠用途臭化メチル購入の手続

る必要があり、使用内容を記録しておくことも求められる。すでに従来の臭化メチル剤の登録は失効していて、「不可欠用途専用臭化メチル剤」が新しく登録されている。

臭化メチルを巡る動きはますます厳しくなっており、土壌病害対策の再構築と普及に向けた、最後の正念場を迎えていると入ってもいいであろう。

今後の土壌病害対策

土壌病害対策では、土壌病害を発生させないような栽培管理が基本とというものの、現実には土壌病害が蔓延してしまっている圃場も数多い。そうした圃場では、抵抗性品種・台木で対応できる場合を除き、土壌消毒が重要な手段となる。土壌消毒では、クロルピクリンやメチルイソチオシアネート、D-Dなどの臭化メチル代替農薬を用いた化学的な土壌消毒と、熱を利用した物理的手段が主力となると考えられる。これに、日常の耕種的努力、抵抗性品種・台木の導入、状況に応じて生物農薬の利用などを総合的に組み合わせるのが、ポスト臭化メチル時代の土壌病害対策の姿であろう。

代替農薬の新規開発や既存剤の利用性向上技術の開発は、臭化メチル問題が生じて以降、急速に伸展した。寒冷期での効果や処理時間の長さ、価格面などで臭化メチルにおよばない点はあるが、防除効果の面では満足できる段階となっている。その中で最有力と目されているのはクロルピクリン剤である。有効範囲が広く、効果も高い。最大の難点である刺激臭問題も、注入装置の改善と製剤方式の工夫で、改善が図られている。クロルピクリン剤以外では、メチルチオシアネートとその関連剤が注目される。なかでもタゾメット剤が広範囲の登録をもつ。本剤は土壌中で分解される際にメチルイソチオシアネートが生成され、防除効果を示す。刺激臭が少なく処理が容易である。

物理的消毒法は、「安心・安全」ブランド対応という視点から、今注目を集めている。10種類ほどのメニューがあり、圃場の条件や消毒実施時期などによりメニューを使い分けることも可能となってきた。詳細は後述する。

生物農薬は、シュードモナス・フルオレッセンス剤、パスツーリア・ペネトランス剤、非病原性 *Fusarium* 菌などが上市され、農業現場にも入りつつある。期待は高いが、防除効果の安定性と即効性、コスト面での問題点の克服、適用場面の拡大など、広く普及させるためにはまだ多くの問題点を抱えている。

抵抗性品種・台木は、局面によっては最有力手段ともなり、また土壌消毒との組み合わせで有力手段ともなりうるものである。しかし、現状では防除効果の安定性と適用場面の少なさが普及のためのネックとなっている。

農業現場へ今すぐに適用できる技術に仕上がっていないのが、土壌伝染性ウイルス病対策である。弱毒ウイルスに対する期待が大きく、メロンやスイカの緑斑モザイクウイルスに対しては実用的な防除効果がえられる弱毒ウイルスが開発されており、トウガラシマイルドモットルウイルスに対する弱毒ウイルスの開発も進んでいる。抵抗性品種の育成も手がけられている。しかし、安定した防除効果の確保、弱毒ウイルスによる生育抑制への対応、農薬登録の実現など、実用にはまだ若干の時間的余裕が必要である。土壌伝染性のウイルス病に対しては、化学合成農薬や物理的消毒法の効果はあまり高くない。ただ、メロンえそ斑点病などのように、病原ウイルスが土壌中の糸状菌により媒介されるタイプの病害では、一部防除効果が認められた事例もある。また、熱水土壌消毒や蒸気消毒を続けているとウイルス病の発生が少なくなってきたと話す農家もあり、今後の解析が待たれるところである。当面は抵抗性品種・台木の利用と残渣処理などの耕種的対策を実行しながら、不可欠用途として承認された範囲において臭化メチルを使用するということとなる。今後の技術開発がまたれる。

熱を利用した土壌消毒

熱を利用した土壌消毒法は、「安心・安全ブランド」志向の高まりとともに、注目を集めている分野である。日本はこの分野では先進国で、10種類ほどある消毒法のうち半分程度が、日本での技術開発の成果に負う部分が多い。熱を利用した土壌消毒では、病原菌や線虫の耐熱性が比較的高くないことを利用する。また、微生物を高温に接触させるとすぐに死滅すること、比較的低温でも長時間接触させるとやはり死滅することを利用する。

とはいっても、土壌には多くの空隙部が含まれ、熱伝導は良好でなく、熱源から離れるほど地温を上げることは容易でなくなる。そのため、消毒に有効な温度域までいかに効率よく地温を上げるかが、熱を利用した土壌消毒をうまく実施するためのポイントとなる。そのための戦略という視点から分類すると、熱を利用した土壌消毒法は4つのタイプに分類できる。

第1の戦略は、地温を上げる範囲を熱源近傍の限られた範囲に限定した手法である。火炎消毒がこれに属する。オオムギ縞萎縮病に対する防除効果が確認されたという報告はあるが、消毒可能範囲がごく限られるため、実際には除草などの限られた目的でのみ利用されている。現在開発途上のマイクロ波加熱消毒も、このタイプにはいる。

第2のタイプは、土壌を攪拌して、熱が全体に行き渡るようにするものである。焼土法がこれに属する。育苗土や高設栽培用の土壌消毒に使われている。長時間かけて面積1haの圃場の土を、深さ50cmまで全部処理したという農家事例もあるが、現実的には、一般圃場での使用は困難である。

第3のタイプは、じっくりと時間をかけて消毒に有効な温度域に地温が達するのをまつというタイプである。このタイプの技術の基本となるのは、太陽熱消毒法(図4)である。

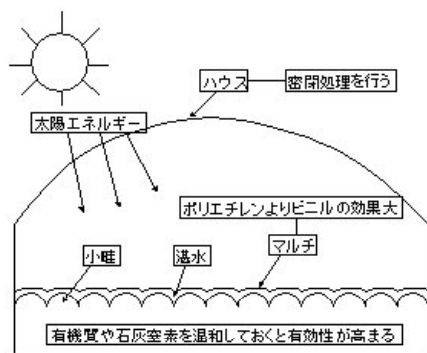


図4 太陽熱消毒法

この方法は、夏期に施設を密封して太陽熱を取り込んで地温を上げ土壌消毒するもので、小畦を立てたり水分を充分に与えることで地温が上がりやすくする。石灰窒素や有機質の添加は、効果を高める。太陽熱消毒法は、コストをかけずに土壌消毒ができるという極めて重宝な方法であるが、その特性上、晴天が持続することが必要条件であり、天候不順の場合には、防除効果が不安定となる。また北日本や高標高地への適用、夏期以外の時期の実施も、十分な防除効果を得ることができない場合が多い。

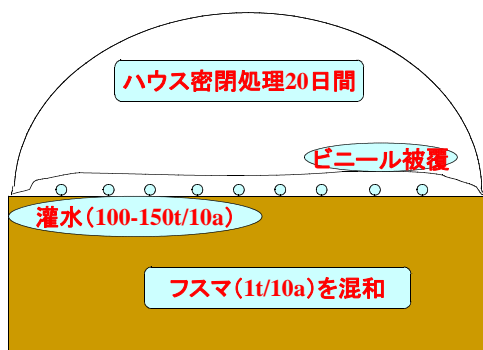


図5 土壌還元消毒法

太陽熱消毒法のもつこのような欠点を改良したものが、「宮崎方式」とよばれる改良型太陽熱消毒法と、土壌還元消毒法(図4)である。「宮崎方式」では、施肥や作畦を終えてから太陽熱消毒を行い、消毒完了後は、再度耕起することなくそのまま定植する。消毒効果が不十分な下層土の耕土層への混入が防げるので、防除効果は改善される。

土壌還元消毒法では、土壌中に微生物により分解されやすい有機物を混和してから、太陽熱消毒を行う。有機物としては、フスマまたは米ヌカがよく使用される。土壌還元消毒法では、熱の効果に加え、微生物が急激に増殖することによる土壌の還元化の進行、多量の有機酸の生成などの複合効果により、防除効果がより安定するようになる。

地中加温消毒(図6)も、どちらかという、時間をかけて消毒に有効な温度域に地温が達するのをまつタイプに属する。この方法では、地中に埋設した放熱管の中に温水あるいはポリエチレングリコールなどの熱媒体を循環させ、土壌内部から地温を上げる。合わせて、土壌表面からも熱を取り込む。土壌表面からの熱の取り込みは、通常は太陽熱消毒によるが、熱水土壌消毒

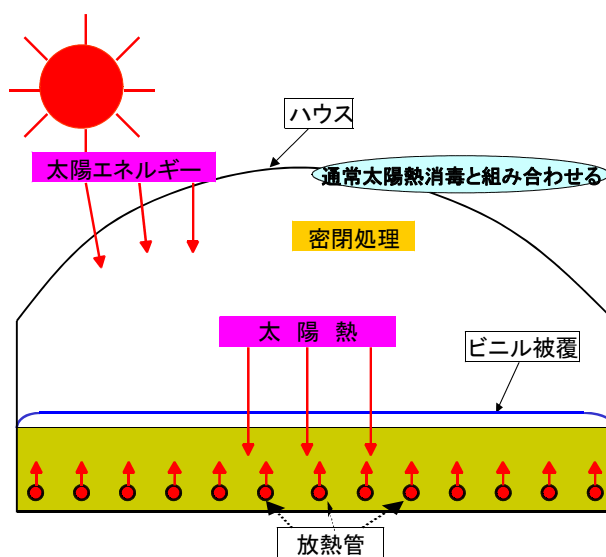


図6 地中加温消毒法



図7 蒸気消毒実施風景

との組み合わせでは、通年実施可能となる。放熱管の埋設を必要とする。

第4のタイプは、土壌表面から浸透性のある熱媒体を地中に浸透させて地温を上げ、消毒するものである。古くから実用化されている蒸気消毒（図7）と、近年注目を集めている熱水土壌消毒（図8）、新開発の散水蒸気消毒（図9）が、このタイプに属する。技術の性格上、極端な寒冷期を除くといつでも実施可能であるが、熱媒体の透過性に欠ける土壌での防除効果は低くなる。また蒸気や熱水など、高温の熱媒体を調製するための機械と、それを注入するための装置が必要である。

蒸気消毒は、水蒸気が液化する際に放出する熱を利用して地温を上げ、土壌消毒を行う。アメリカやヨーロッパでは1930年代から広く普及し、わが国でも

1960年代から使用されるようになった。水蒸気を土壌中に浸透させるための方式は、水蒸気を放出するための穴をあけたパイプを土中に埋設するホジソンパイプ方式と、土壌表面に並べた布製のホースから蒸気を放出するキャンパスホース方式が主体となっている。水蒸気の性質上、放出地点から下部へと浸透させることが困難な場合が多い。圃場全体の消毒の他、畦部分など特定の場所のみを消毒することも可能である。防除効果は、一般に水蒸気を土中で放出する方式の方が、水蒸気を圃場表面から浸透させる方式よりも安定している。静岡県温室メロン栽培などで広く普及している底部に蒸気放出管を備えた隔離ベッドなどは、蒸気消毒には好適の栽培システムで、防除効果も高い。床土消毒のためには、土をつめた蒸箱に水蒸気を通すといった簡単な方式のもの、あるいは荷台底部に蒸気放出管を設置した軽トラックを利用して蒸気消毒を行う方式など、簡易な装置も開発されている。消毒に水蒸気を用いる関係で、消毒しようとする区画は被覆フィルムで覆い、その裾部は鉄鎖や水枕で押さえて、密閉状態にしておく必要がある。また土中に水蒸気の放出管を埋設する作業は容易でないことが多い。このため、蒸気消毒では作業性の悪さが常に指摘される。反面、実施可能な時期の幅が広く、暖地では年間を通して実施可能である。蒸気消毒後の土壌では可溶性のマンガンが増加する。また硝酸化成菌の減少によりアンモニア態窒素が増加する。可溶性マンガンやアンモニア態窒素の増加は、作物の生育障害に結びつく場合がある。

熱水土壌消毒は、圃場表面から高温（80-95℃）の熱水を土壌中に浸透させ、その熱エネルギーを利用して地温を上げ消毒する。透水性に優れた圃場では、各種物理的消毒法の中で最も安定した防除効果を示すことが多い。反面、透水性が劣る圃場や傾斜のある圃場では、効果が劣る場合がある。実施可能時期の幅は広く、厳冬期を除けばいつでも実施可能である。暖地では年間を通して実施できる。ただし、地温の高い時期に実施した方が、消毒効率は高くなる。熱水を注入する方式には、牽引式とチューブ式の2通りがある。牽引式は、熱水を噴出させる小孔を多数備えた注入装置を圃場の一端に、他端にウインチを設置して、圃場の端から端まで注入装置を移動させながら熱水の注入を行う。チューブ式



図4 熱水土壌消毒の実施風景(1:熱水調製用ボイラー, 2:チューブ式での熱水注入状況, 3:牽引式での熱水注入状況, 被覆をはずして見やすくしている, 4:牽引用ウインチ)

では、耐熱性の灌水チューブから熱水を噴出させて、注入する。作業の効率性の面では牽引式が優れているが、チューブ式は応用範囲の広さに特徴があり、透水性のやや劣る圃場や傾斜のある圃場では牽引式よりも優れ、作畦後の部分消毒、追加給水（熱水の注入終了後に常温の水を追加する。これにより消毒効果はより高くなる）などへの利用も可能である。熱水土壌消毒では、どの程度の深さまで消毒するかを、単位面積当たりの熱水注入量を変えることによって調整できる。熱水注入量の目安は、深さ 20cm までの消毒を望む場合には 100 ㍓/m^2 、深さ 30cm までの消毒を望む場合には 150 ㍓/m^2 、深さ 40cm までの消毒を望む場合には 200 ㍓/m^2 であるが、実際的には、対象病害虫や実施時の地温、圃場の透水性などによって、かなり異なってくる。消毒後の土壌では可溶性マンガンが増加したり硝化細菌群の減少に伴うアンモニア態窒素の増加が見られるなどの点は蒸気消毒と同様であるが、熱水土壌消毒では増加程度が蒸気消毒よりも少なく、かつ急速に減少に向かう。したがって、生育障害発生の可能性は低いと考えられている。また消毒後の土壌では作物の生育が旺盛になり、葉や花、果実なども大型化する傾向がある。消毒効果の持続期間も比較的長い傾向にあり、3年間効果が持続した事例もある。

散水蒸気消毒は、キャンパスホース方式による蒸気消毒の実施後に圃場表面から散水する方式である。通常の蒸気消毒よりも深い層までの消毒が可能である。散水された水は、

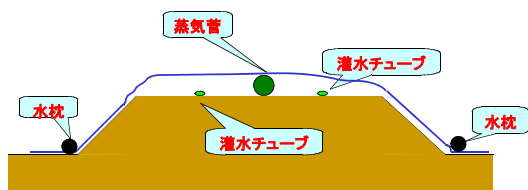


図8 散水蒸気消毒法

蒸気消毒に伴って高温となった土壌表層部を通過する際に暖められて熱水となり、従来の蒸気消毒では水蒸気の浸透が困難なより深い層まで、熱エネルギーを運ぶことが可能である。最も新しく開発された方式で、現在農家

表2 熱を利用した主な物理的消毒法

種 類	内 容 と 特 徴
火 焰 消 毒	一種の火焰放射機で土壌表面に火焰を吹きつけ、消毒を行う。土壌内部への熱の浸透はほとんどなく、表土上の病原菌、昆虫、雑草などにのみ有効である。除草などという限られた目的に利用可能である。
焼 土 法	土壌を攪拌しながら熱し、消毒する。床土消毒や隔離ベット用の土壌消毒には有効であるが、本圃への適用は困難である。
蒸 気 消 毒	水蒸気を地表面あるいは土壌内部から浸透させることにより消毒を行う。隔離ベット栽培や床土消毒では極めて有効。土耕栽培では効果がやや劣る。作業性と、マンガン過剰症発生の恐れがある点にやや難がある。ヨーロッパでは広く使用されている。使用時期の制限もほとんどない。
太 陽 熱 消 毒	土壌に十分な水分を持たせた上でマルチを行い、施設では密閉処理して太陽のエネルギーを取り込み、消毒を行う。コストのかからない有用な技術で、施設栽培の基本技術の一つといえる。難点は、防除効果が天候に左右されやすいこと、高標高地や寒冷地では実施困難なこと、実施時期が夏期に限定されること、処理に長時間を要すること、露地圃場での効果は限られていることなどである。わが国で開発・実用化された技術で、海外にも広まっている。消毒実施前に稲わらなどととも石灰窒素を施用すると効果が高くなる。
改良型太陽熱消毒	「宮崎方式」とも呼ばれ、施肥や作畦を済ませた後で太陽熱消毒を行い、消毒終了後はそのまま定植作業に移行する。消毒不十分な下層土が耕土層に混入する可能性が少なくなり、防除効果が高まる。
熱 水 土 壌 消 毒	土壌中に熱水（通常 80～95℃）を注入して地温を上げ、土壌消毒を行う。積雪地などを除くと冬期でも実施可能（効率は夏期よりも劣る）で、作物の生育も良好となる場合が多い。多量の水を必要とする。マンガン過剰症発生の可能性は低い。傾斜地や難透水性土壌を除くと、防除効果は安定している。わが国で開発・実用化された技術である。
土 壌 還 元 消 毒	土壌中に多量の分解しやすい未熟有機物をすきこんだ上で、太陽熱消毒を行う。他の物理的消毒法より低温でも効果があり、寒冷地や高標高地でも実施可能である。作物に対する生育促進効果も認められる。実施時期は夏期を中心とした時期であるが、熱水土壌消毒と組み合わせることで実施可能時期の幅は広がる。保水性の劣る土壌での効果はやや低くなる。
土 中 加 温 消 毒	土壌中にパイプを埋設し、そこに熱水あるいは熱媒体となる液体、場合によっては高熱の気体を循環させて、土壌内部から地温を上昇させて消毒する。土壌表層部分の消毒は、通常太陽熱消毒とする。コストはかかるが、土壌深部までの消毒が可能である。
散 水 蒸 気 消 毒	通常の蒸気消毒を終えた後で表面から散水する。散水された水は蒸気のもたらしたエネルギーを受けて熱水に変わり、下層に浸透する。蒸気消毒よりも下層部の消毒効果を高めることが可能である。わが国で開発され、現在実用化の道を歩みつつある最新技術である。
マイクロ波加熱消毒	マイクロ波あるいは高周波を照射して、殺菌する。育苗用土などで効果が認められているが、実用化は今後の課題である。

圃場での実証が進められている。

熱を利用した土壌の物理的消毒法は、臭化メチル代替技術としてだけでなく、「安心・安全」ブランドに対応できる技術として、次第に関心が高くなっている。しかし、それぞれの技術は、原理や適応可能な範囲が大きく異なっているので（表2）、特徴をふまえた利用の仕方が必要であることはいままでのないことである。