



---

---

# あたらしい 農業技術

---

---

No.590

耕作地を汚染した放射性物質を集めて安全に処理する方法の一提案

平成 25 年度

— 静岡県経済産業部 —



# 要 旨

## 1 技術、情報の内容及び特徴

### (1) 放射性物質に汚染した作物の効率的減容化技術の開発

放射性物質に汚染された作物の安全性に配慮した減容化技術を検討しました。竹で作製した通気管をはさみこんで汚染作物を堆積し、それを防水性通気シートで被覆する無攪拌堆肥化処理技術により、ほ場で回収された作物を2～3か月という短期間で1/2容積まで減容化できました。高水分状態を維持するほど分解が促進されました。

### (2) 牧草による汚染土壌の清浄化

植物を利用したセシウム汚染土壌の清浄化には、不良環境下において生育と収量性が良好であることから牧草が注目されています。そのうち、夏季に清浄化を実施するには、短期間に生育する飼料ヒエ、長期的に清浄化を継続するには、永続的な安定多収とともに土壌被覆による汚染表土の移動が抑制できるペレニアルライグラス+シロクロバ混播が適するという結果となりました。

### (3) 汚染作物の効率的回収及び汚染作物回収時の作業安全性

植物体に吸収されたセシウムは、成熟した葉に多く蓄積されますが、成熟した葉は乾燥すると容易に崩壊・脱落する特性があります。そのため、成熟葉を効率的に回収するためには、通常の牧草収穫では作業効率が悪いために使われない高水分収穫が適しています。作業効率は悪いのですが、有害性が高いと思われる粉じん発生も少なく、肝心の葉の脱落損失も抑制できました。

## 2 技術、情報の適用効果

原発事故で放出された放射性物質で、汚染作物が多量に発生しましたが、これらは科学的、社会的に慎重な取り扱いが要求されます。農作物への信頼を回復するためには、安全性の高い汚染作物の処理技術や汚染土壌の効率的清浄化技術を実施して、消費者に農作物の安全性をアピールすることが必要です。また、何より農業生産者の不安を取り除くためにこのような緊急手段はとても重要です。

## 3 適用範囲

県下全域。(大家畜用高効率粗飼料収穫機械の利用可能な地域)

## 4 普及上の留意点

無攪拌堆肥化による減容処理では、堆積内部に過乾燥による分解停滞部分が生じるため、高水分材料で処理を開始すると共に、適切な加水処理を実施すると分解が促進されます。乾燥しすぎると分解の停滞ばかりでなく、カビや粉じんの飛散原因にもなります。

## 目 次

はじめに	1
1 無攪拌堆肥化处理による減容化手法の検討	2
2 減容促進要素の検討	5
3 牧草による土壤汚染の清浄化	6
4 汚染作物収穫時の落葉損失及び粉じん発生量	7
おわりに	9
参考文献	9

## はじめに

福島原発の爆発事故で大気中に放出された多量の放射性物質は、様々な濃度で広範囲の作物・土壌を汚染しました。多量に発生した汚染作物は取扱いが難しく、科学的・社会的に大きな問題となりました。遠く離れた本県でも、風評被害を主体に大きな影響を受けましたが、農作物の信頼を回復するための消費者への安全性アピール、そして何よりも農業生産者の不安を取り除くため、安全性の高い汚染作物の処理技術や汚染土壌の効率的清浄化技術の開発は緊急かつ重要な事案となりました。そこで、静岡県新成長戦略研究「環境を汚染した放射性物質の散逸防止と効率的回収技術の開発」において集中的な試験を実施し、具体的対策の一提案を行うため、次のような検討を行いました。

- ①大量発生した汚染作物の長期間隔離保管容積を安全・省力的に減らす方法として、家畜排泄物処理技術として開発されてきた各種の省力・低コスト技術のうち、有機物分解効率の高い好氣的発酵を、攪拌作業をしないで効率的に達成する手法の応用を検討しました。
- ②この減容効果を加速する要素を明らかにするため、材料水分の程度、発酵スターターの有無、油脂添加及び加水効果の有効性を実験室規模で検討しました。
- ③既に、放射性物質、特にセシウムに汚染されてしまった土壌を生物的に清浄化する技術として、効率性・省力性で有利とされる数種の牧草を活用し、土壌中セシウム回収効率を調べました。
- ④作物中に吸収されたセシウムが、高濃度に蓄積される成熟葉を安全で効率的に回収する技術を検討しました。

これらの緊急的な研究は、国内各所で実施されると同時に様々な法令も整備されました。そのため、今回開発した技術が利用される場面は限られる可能性もありますが、何より利用しなければならない場面が来ないようにする技術開発こそが本当に望まれます。

◎この研究成果は、静岡県新成長戦略研究「環境に散逸した放射性物質の散逸防止と効率的回収技術の開発」の一部をまとめたものです。

## 1 無攪拌堆肥化処理による減容化手法の検討

放射性物質に汚染された作物・植物は、汚染レベルにより法令等で長期間の隔離保管が義務づけられるため、その隔離保管スペースを極力、小規模にする減容化処理が必要です。植物体の体積減少は畜産技術の「堆肥化」そのものですが、分解促進のための攪拌処理（切り返し）は安全性の点から好ましくありません。そこで、空気は通すものの水は通さない堆肥調製用通気性被覆資材と堆積中に空気を導入する穴あき通導管を利用した無攪拌堆肥化による減容処理を検討しました。

### 実験1 通気性資材別・材料水分別減容効果

この実験では、家畜糞の堆肥化に最適な条件とされる、水分65%への調整と通気処理が汚染作物の減容化処理に適するかどうかを調べました。

汚染物質を含む滲出（しんしゅつ）水の流出を防止するため、土塁を周囲に配置した区画（5×5m）に不透水性シートを敷き、その上に50cm厚毎に通気のための通導管を埋設しながら実験材料とした牧草を積上げ、四角錐台（下辺3m×上辺2m×高さ1.2m=7.6m<sup>3</sup>）に成型後、全体を通気性シートで被覆しました（写真2～7）。材料水分は85、75及び65%とし、通気については、通導管を設置しない無通気区、樹脂性通導管（暗渠パイプ）またはスリットをつけた節抜き竹（写真1 最終処分時に汚染作物と共に埋却可能）を配置した暗渠区、竹区としました。堆積後、2週間毎に体積変化、廃汁組成、廃汁発生量、発酵温度及び有機物分解率等を約2か月間調査しました。



写真1 竹の加工：丸ノコで2本切れ込みを入れドライバでこじってスリットを作る

その結果を表1に示します。材料水分が高いほど減容化の割合が大きくなりました。初期段階ほど水分の違いによる減容化の差が大きく、期間が進むにつれて水分による差は小さくなりました。初期段階では通気区、そして通気資材では暗渠区より竹区の方が減容化が促進され、約2～3か月という短期間で約1/2体積にまで減容できました。

処理中の材料の成分や性状の変化は、採材場所によって大きく異なりました。具体的には、底部や被覆シート接触面といった高水分になる部位では泥状に変化した一方で、通気の良い部位では、極端な低水分化とカビの発生が観察されました。特に、最も低水分の65%区では、炭化あるいはサイレージ化し、減容しない状態になっていました。乾燥粉碎した試料体積も、泥状部ほど、有機物分解率が高くなりました。いずれの試験区でも、被覆された状態にもかかわらずアンモニア臭、酪酸臭や吉草酸臭といった強い悪臭が感じられました。



写真2 土塁で囲った区画に不透水シートを設置



写真3 シート上に処理材料を搬入



写真4 50cm 堆積の上に竹通導管を設置



写真5 堆積直後の状態



写真6 通気性防水被覆シートで被覆



写真7 数週間で減容し、汚染廃汁も流出しない

表 1 通気性資材・材料水分が無攪拌堆積処理時の牧草成分変動に及ぼす影響

	無機化率(%)	水分(%)	酢酸(%)	プロピオン酸(%)	酪酸(%)	吉草酸(%)	NH <sub>3</sub> (ppm)
竹通気 65%	14.8	68.9	0.29	0.54	0.12	0.01	938
竹通気 75%	15.7	80.8	0.01	1.12	0.02	0.00	878
竹通気 85%	18.2	81.7	0.11	0.66	0.03	0.00	1,090
暗渠通気 65%	16.3	62.6	0.30	0.25	0.14	0.01	837
暗渠通気 75%	16.6	81.5	0.21	0.73	0.11	0.00	1,023
暗渠通気 85%	17.1	78.5	0.00	0.14	0.17	0.01	926

## 実験 2 減容化に及ぼす加水効果の検討

実験 1 でわかった事は、材料水分が高いほど減容化が早く、通気すると減容化の立ち上がりが早いということでした。そこで、通気だけでなく、定期的に加水分した場合の減容化効率を調べました。実験 1 同様に、あらかじめ水分 65% に水分調整した堆積に樹脂製暗渠管またはスリット付の竹を配置し、加水間隔と量は 1 週毎に 1 m<sup>3</sup> 当たり 8 L としました。

図 1 に、加水処理効果を示しました。やはり、加水すると減容化割合、速度とも促進されました。

結局、好気的な有機物分解促進よりも嫌気的分解の方が効率的ということが分かりました。

また、低水分化した状態では、土壌埋却や焼却等の最終処分に向けて移動する際に、多量の粉じんやカビ胞子が舞い上がるために、作業性・安全性の点でも加水した方が好ましいと言えます。しかし、高水分化にも問題があり、処理中の悪臭の増加や、移送時のハンドリング性が低下します。そこ

で、最終処分方法を考えた上で減容化処理を実施する場所を選定する必要があると思われます。

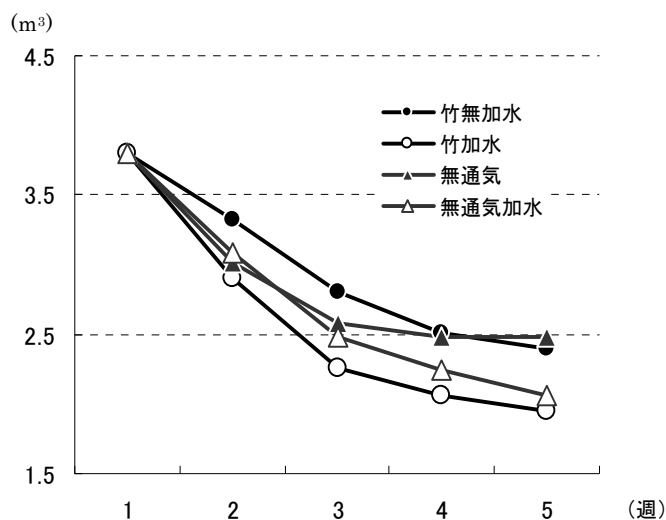


図 1 無攪拌堆肥化処理における、通気と加水が作物の体積変化に及ぼす影響

加水処理は材料の無機化を促進しましたが、水に触れた部分は速やかに泥状に変化するため、その下の部分に水が浸透しにくくなる現象が発生します。今回は、通気用資材を水平方向のみに配置しましたが、斜め配置といった加水も考慮した通気管配置も考慮すべきかもしれません。今回は最終処分を考慮して、材料と共に腐敗する竹を通気性資材として利用し、樹脂性通導管と同等の結果を得ました。ただし、生育 2 年目以内の竹では腐敗が早すぎて通気管として利用できま



せんでした。

## 2 減容促進要素の検討

作物体積の減容化を促進する条件を明らかにするため、実験1の実用規模試験と並行して小規模堆実験装置を使用して水分調整効果、発酵スターター添加効果、発酵エネルギー添加及び加水の有効性を検証しました。

イネ科主体牧草の乾燥切断物を小型堆肥化実験装置（かぐやひめ、富士平工業）を用い、以下の条件で減容促進効果を調べました。

- 1) 水分65%の条件下で、どこでも入手できる発酵スターター(種菌)である堆肥と堆肥発酵促進剤として販売されている発酵菌製剤の添加効果は無添加と比較。
- 2) 水分65%条件下で、発酵エネルギーを付加する油脂(乾物0.5、2.0%)の添加効果。
- 3) 水分80%条件下での油脂(0.5%)添加効果。
- 4) 加水(排汁還元または水分保持)効果。

これらのうち、実験1で扱わなかったスターター添加効果と油脂添加効果の結果を御紹介します。

図2に、水分65%におけるスターター添加効果を示します。高価な市販添加剤を使用しなくても発酵菌を多量に含む堆肥を0.1%（現物）添加すれば発酵は促進されることがわかりました。ただし、均一に堆肥等を添加する手間を考えると処理期間が多少延長しても無添加で実用上は問題がないかもしれません。

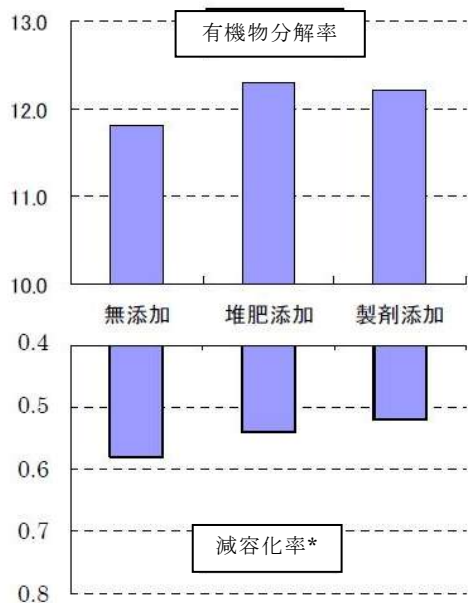


図2 水分65%におけるスターター添加効果

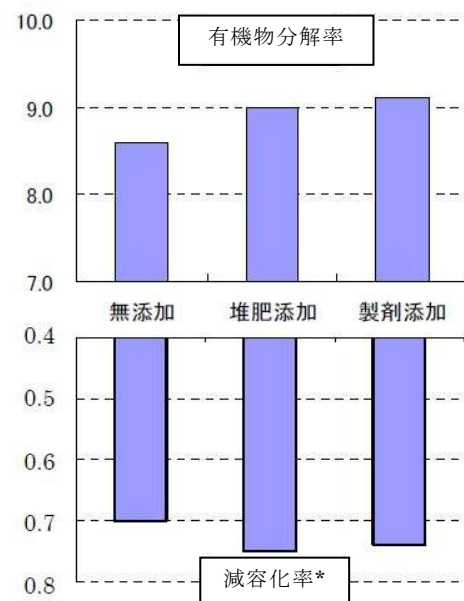


図3 水分65%における油脂・スターター添加効果

\* 減容化率 = (1 - 体積)

図3に油脂添加とスターターを同時添加した結果を示します。発酵促進を狙って発酵エネルギー源を添加しましたが、発酵熱による低水分化のためにかえて有機物分解は停滞しました。

以上をまとめると、何も添加せず、なるべく材料を高水分に保つことが効率的な減容化のポイントとなります。



写真8 左 水分80%処理した減容化試料  
右 その内部:乾燥して分解が停滞している

### 3 牧草による土壤汚染の清浄化

土壌・作物汚染の主体となる放射性セシウムはカリウムと類似した動きをするので、カリウム吸収効率がよく安定多収な作物で放射性セシウムを効率的に除去できる可能性があります。低pH条件ほどセシウム移行が高いため、不良環境下でも多収な牧草は土壌清浄化作物として期待されています。そこで、そのような牧草の中から、本県の黒ボク土に適合する飼料ヒエ、ペレニアルライグラス及びペレニアルライグラス+シロクローバ混播草のセシウム吸収量を調べました。10号ポットに入れた黒ボク土を希硫酸で、pH4.5、5.5及び6.5に調整し、ペレニアルライグラス、飼料ヒエ及びペレニアルライグラス+シロクローバを株面積直径10cmになるように定植しました。元肥は、N+P(硝酸Na+リン安)とし、K相当量を塩化セシウムとして施用しました。飼料ヒエは2回刈り、その他は3回刈りの地上部と最終刈り後の地下部の重量から算出し、セシウム分析はICP-MS法により分析しました。

各試験区のセシウム濃度と収量から算出されたセシウム吸収量を図4に示しました。作物の栽培体系と収量性から、毎年播種・収穫する短期的な清浄栽培目的には飼料ヒエ、播種後数年間連続的に回収する長期的な清浄栽培目的はペレニアルライグラス+シロクローバ混播が適していると考えられます。牧草には、放射性物質を固定して地中浸透を抑制する性質がありますが、今回のペレニアルライグラスやシロクローバのような放牧用短草型牧草は、さらにヒゲ根によって浅層土をブロック状に固形化する性質があります。現在、吸収除染以外にも、物理的除染手段として、汚染濃度の高い地表をプラウ耕やディスク耕による天地返しにより耕土の深部に埋設する手法が提唱されていますが、この手法でも放射性物質が浅層に分布している段階であれば、牧草栽培によって汚染拡大を効率的に抑制することが可能とされています。

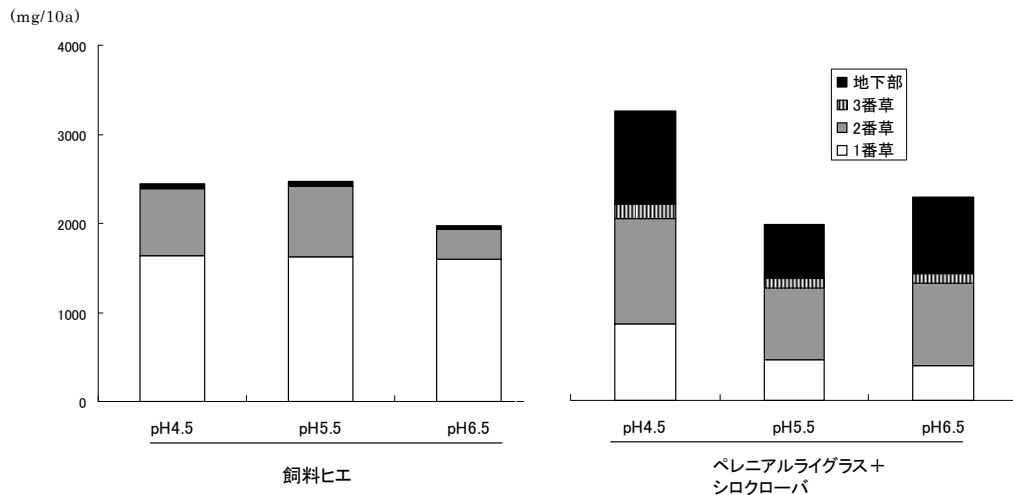


図4 飼料ヒエとペレニアルライグラス+シロクローバ混播牧草のセシウム吸収量

#### 4 汚染作物収穫時の落葉損失及び粉じん発生量

前述のように、作物体に移行したセシウムは植物の成熟葉及び落葉から構成されるリター（土壌表面を覆う落葉層）に、そのほとんどが含まれることが明らかになっています。そのため、汚染作物を牧草収穫機で回収する時は、水分が低下するほど崩壊・脱着しやすい成熟葉の回収効率が重要です。また、汚染葉の崩壊で発生する粉じんは作業安全性の点でも問題ですが、それを調べたデータがありません。そこで、回収作業時の落葉損失及び作業時の粉じんを測定しました。（写真9）

##### 実験1 成熟葉の回収損失量

低衝撃の列転草乾燥法を使い、刈り株や表土由来の分画を排除できる舗装面で転草回数毎の落葉損失を調査しました。転草は、舗装地上にイネ科主体牧草を100mにわたり列状に配置（2.47t/100m、高さ約30cm）し、ジャイロレーキ（IHI スター製 TGR5410）により、合計4回行いました。作業速度は0.167m/s（0.6km/h）とし、1回の作業で200m（1往復）転草しました。その結果、開始時水分の68.8%から転草処理毎に水分が減少すると同時に乾物当たりで1～2%



写真9 圃場における草列反転時の粉塵測定

程度の落葉損失が発生し、4回転草後で6.7%の損失になりました。また、梱包回収時には15%の損失が発生し、合計の損失は21.7%となりました。

## 実験2 作業中粉じん発生量

実際の成熟葉の回収作業時の粉じん発生量は、栽培環境の表土や刈り株に強く影響されるため、黒ボク土（所内ほ場）と砂地土壌（御前崎市）で実施しました。粉じん濃度は、個人曝露濃度測定用サンプラー（NWPS-254、柴田科学製）とMP-Σ3ポンプを使用し、サンプラーを装着した調査者が作業者の近傍で測定しました。黒ボク土ほ場ではイネ科主体牧草、砂地土壌ほ場ではソルガムとトウモロコシの収穫時の粉じんを対象としました。

舗装地における粉じん発生量調査では、表2のように転草回数、すなわち乾燥が進むほど総粉じん濃度は高くなりました。

表2 転草回数毎の回収損失量

作業時間	12/1/11	12/1/11	12/1/11	12/1/12	12/1/12	12/1/12	合計
	9:00	11:00	14:00	12:00	14:00	15:00	
転草回数	0	1	2	3	4	5(梱包)	
材料水分(%)	68.8	67.9	55.0	38.8	20.7	20.7	
損失水分(%)		57.4	46.0	30.8	17.3	17.0	
損失重量(乾物 kg)		5.6	8.3	6.5	7.1	49.8	77.3
乾物損失割合(%)		1.9	2.2	1.4	1.2	15.0	21.7

表3のように、黒ボク土永年牧草地における粉じんでも、材料水分が低いほど、また作業速度が速いほど発生量が高くなりました。日本産業衛生学会による許容濃度の勧告値では、コルク・綿・穀物・木の粉じんは吸引性(PM4)で1 mg/m<sup>3</sup>、総粉じんでは4 mg/m<sup>3</sup>となっており、それ以外の有機物粉じんは吸引性で2 mg/m<sup>3</sup>、総粉じんでは8 mg/m<sup>3</sup>となっています。勧告によれば、これ以上であっても即危険ということではありませんが、牧草回収作業には防塵マスク等の粉じん対策が望まれます。なお、ほ場における粉じん量は舗装地の1.3~5.6倍であったことから、草地が放射性物質に汚染された場合には、成熟葉の回収作業における作業環境の安全性に影響を及ぼすと考えられます。

表3 舗装地及び通常ほ場における回収作業時の粉じん発生量

測定環境	場所	作業内容	開始時間	終了時間	粉じん濃度(mg/m <sup>3</sup> )		
					PM4	PM4以上	総粉じん
南(弱)	舗装地	転草	10:30	11:10	0.37	0.73	1.10
南(やや弱)	舗装地	転草	13:57	14:46	0.00	3.12	3.12
東(弱)	舗装地	転草	9:30	10:15	0.34	3.37	3.70
東北(やや強)	舗装地	転草	14:05	14:42	0.33	3.47	3.80
東南(弱)	ほ場	転草	11:25	11:54	0.00	4.80	4.80
東南(弱)	ほ場	転草	15:03	15:30	0.00	5.47	5.47
南(やや強)	ほ場	転草	10:30	10:54	0.53	11.05	11.59
南	ほ場	転草(通常速度)	13:23	13:35	1.77	19.47	21.24

表4のように、砂地ほ場における粉じんは、ソルガム畑の場合、PM4が0.34~0.90mg/m<sup>3</sup>、PM4以上が0.17~9.86mg/m<sup>3</sup>、総粉じんは0.50~10.56mg/m<sup>3</sup>でした。トウモロコシ畑における収穫作業では、PM4は2.30mg/m<sup>3</sup>、PM4以上は20.72mg/m<sup>3</sup>、総粉じんは23.0mg/m<sup>3</sup>でした。集草と梱包作業は、機械の可動部の地表面との接触機会が多いためリターや土壌由来の粉じんが多いと思われます。

表4 砂地土壌条件下における回収作業時の粉じん発生量

測定環境	場所	作業内容	開始時間	終了時間	粉じん濃度(mg/m <sup>3</sup> )		
					PM4	PM4以上	総粉じん
西(やや強)	ソルガム	刈取	10:42	10:56	0.34	0.17	0.50
西(やや強)	ソルガム	集草	11:21	11:33	0.70	9.86	10.56
西北(やや強)	ソルガム	ロール	12:42	13:37	0.45	8.76	9.21
西北(やや弱)	トウモロコシ畑	収穫	13:45	13:57	2.30	20.72	23.03
西(やや弱)	雑草畑	刈取	11:18	11:45	0.90	0.00	0.90
西北(やや強)	雑草畑	集草	13:20	13:30	0.88	6.19	7.08
西北(やや強、一時雪)	雑草畑	ロール	13:40	14:07	0.46	4.78	5.24

## おわりに

これらの緊急的な研究は、国内各所で実施されて様々な成果が発表されました。そのうちのいくつかは福島等ですぐに実用化されています。汚染された大量の作物を効率的に収穫・回収できる技術は畜産が最も進んでいるため、効率的除染作業の主体は、畜産用作業機が主体になります。被災地で野生化した放置家畜が無人の街を歩き回る姿に、畜産業のつらさを感じている生産者もいるでしょう。しかし、今回御紹介したような仕事をできるのは畜産だけです。ぜひ、畜産業は食料生産以上に大きな社会貢献ができる可能性を持つ産業であるという自負を持っていただきたいと思えます。

本来、この「あたらしい農業技術」も、生産者の皆様のお役に立つことを願って作成されるものですが、今回の技術だけは、本県で役立つ日の来ないことが強く望まれます。

## 参考文献

- 1) 福光健二・東村栄之助. 1984. バッグを用いた家畜排泄物の堆肥化. 家畜ふん尿のバッグによる堆肥化試験. 畜産の研究. 38. 39-44
- 2) 北條亨・神辺佳広・脇坂浩. 2005. 家畜排せつ物の簡易堆肥化保管技術の確立. 栃木畜試研報 21. 15-23
- 3) 松本武彦・木村義彰・高橋圭二・寶示戸雅之. 2006. シートを用いて被覆した牛ふんの堆肥化過程における肥料成分の挙動. Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr. 395-400
- 4) 室伏祥子・伊藤隆政・高藤誠・須田俊之・久保田信彦. 2011. 植物の土壌浄化能力(ファイトレメデーション)による放射性同位体の回収及び処理方法. IHI技術51. 4. 87-90

- 5) 田邊眞・川村英輔. 2009. 全面有孔の暗渠管を利用した牛ふんの簡易堆肥化技術. 神奈川畜  
技セ研報 2. 30-33
- 6) 鳥巢諒・木村重信・田代克己. 1980. 牛ふんの急速堆肥化への含水率と通気量の影響. 農機  
学誌. 42. 135-140
- 7) Alexakhin RM, Sanzharova NI, Fesenko SV, Spiridonov SI, Panov AV, 2007. Chernobyl  
radionuclide ditribution, migration and environmental and agricultural impacts, Hea  
lth Physics 93. 418-426
- 8) Chou FI., Chun HP., Teng SP., Sheu ST. 2005 Screening plant spiecies native to Taiwan  
for remediation of 137Cs-contaminated soil and the effects on the transfer of 137C  
s from soil to plant. J. Environ. Radioact. 80. 175-181
- 9) Heinmann K., Vogt K.J. 1980. Measurement of the deposition of iodine onto vegetati  
on and of the biological half-life of iodine on vegetation. Health Physics, 39(3), 46  
3-474
- 10) IAEA, 1982. Generic models and parameters for assessing the environmental transfe  
r of radionuclides from routine releases, IAEA Safety Series 57, 61-65
- 11) 原子力環境整備センター. 1998. 土壌から農作物への放射性物質の移行係数」
- 12) Soudek P., Tykyva R., Vanek T. 2002. Plant uptake of 134Cs in relation to soil pr  
operties and time. J. Environ. Radioact, 59, 245-255
- 13) Vandenhove H., Van Hees M, 2004. Phytoextraction for clean-up of low-level uranium  
contaminated soil evaluated. Phytoextraction for clean-up of low-level uranium con  
taminated soil evaluated.
- 14) 原田久富美 2011. 「東京電力福島第一原子力発電所事故後の畜産草地分野の対応と今後の  
展開」(2)土壌から飼料作物への放射性セシウムの移行低減対策と今後の課題. 未発表
- 15) 北海道農業試験場農業物理部機械化第2研究室 1969. マメ科牧草の落葉損失に関する試験
- 16) 三浦恭志郎・石川文武 1978. 農業粉じんの実態. 農業機械学会誌40(2) : 278-282
- 17) 日本産業衛生学会 2006. 許容濃度等の勧告(2006年度). 産業衛生学雑誌 48(4) : 98-123
- 18) (独)労働者健康福祉機構 栃木産業保健推進センター 2009. 「屋外作業等における作業管理  
に関するガイドライン」における屋外作業場従事者の作業環境測定. <http://www.tochigisanpo.jp/research/2009/09/08/000365.html>

静岡県畜産技術研究所 飼料環境科 科長 片山信也  
上席研究員 高野 浩

発行年月：平成26年3月

編集発行：静岡県経済産業部振興局研究調整課

〒420-8601

静岡市葵区追手町9番6号

TEL 054-221-2676

この情報は下記のホームページからご覧になれます。

<http://www.pref.shizuoka.jp/sangyou/sa-130a/>

