

■ 展望・解説 ■

汚泥の有機肥料化による植物成長促進と 二酸化炭素固定化への効果の考察 (II)汚泥の有機肥料化への期待(その1)

Studies of Effects on Plants Growth and Carbon
Dioxide Fixation by Organic Matter Derived from Sludges.

(II) Effective Production of Organic Fertilizers
Derived from Sludges, Part (1).



小林 達治*・上野 勲**

Michiharu Kobayashi Isao Ueno

1. はじめに

第二次世界大戦後、食糧生産は無機の化学肥料と化学農薬の施用により、その生産量は飛躍的に増大し、人類の食糧を確保してきている。しかし、これ迄の農法では、植物病原菌が化学農薬に対し耐性を持つようになり、その結果連作障害は極限に達しつつある。農耕地は劣悪化の一途を辿り、砂漠化に拍車をかけている。また半乾燥地帯では、莫大な費用をかけて造った「ダム」に貯えた、灌漑用水を供給し、農耕地化しても、それ迄、良好な農耕地が急激に不毛の地へと逆行しつつある。

国連環境計画UNEPの調査によると、年間四国と九州を合わせた面積5万km²の土地が不毛の耕地になりつつあるという。この事は地球上に於いて、農耕地拡大面積より不毛化・砂漠化する面積の方が大きいという結果を示している¹⁾。

もう少し理解を深める為に具体的に例を上げると、世界のトマト関連製品の50%以上を生産しているカリフォルニアの“トマト”の生産地では、化学肥料と農薬施用により栽培を続けてきたが、農耕地は塩類が集積し、耐農薬性植物病原性菌により、その障害は極めて厳しい状態にある。また、アマゾン地帯へ入植し、ビメンタ（オールスパイス）を世界的規模で生産してきた農民は、やがて農耕地の連作障害に見回れ、一望千里全滅の憂き目にあい、土地を放棄し、大都会へ逃げ込み、大きな社会問題を引起している。

一方、大都会の下水汚泥は、その処理・処分年々多額の経費を投入し続けてきている。また、大型畜産飼育場より排出する畜産糞尿等の有機高含有廃棄物は、その棄場に困る情勢にある。

本後編(II)では、種々の産業廃棄物の中で、最も価値の低い物と考えられていた、下水処理「汚泥の有機肥料化への期待」について展望・解説をする。そのような産業界にとって最も邪悪な価値のない物と考えられていた汚泥も、前編(I)「植林への有機肥料効果の期待」²⁾で展望・解説をした如く、植林への生長促進効果が非常に大きい事を理解した。

そこで本編(その1)では、具体的にそのような廃棄物を“好気発酵”し、その有機肥料化された廃棄物を大地に戻す事により、劣悪化・砂漠化された農耕地を再び良好な農耕地へと蘇生しうる。植林はもとより再び農産物を生産しうる大地へ再性化しうる。更には、米の自由化対策等に対処しうる、顕著な増産技術へ応用可能にした、その基礎理論的データを示す。

尚、本データは汚泥発酵肥料による農作物への顕著な効果があった場合の、数少ない試験例の紹介ではなく、過去15年以上に亘って全国津々浦々の実験農家、並びに、農業協同組合の協賛の下に、試行してきた結果である。従ってその実験条件は、日本全土をカバーする土壌と気候下に於いて試験し、追認試行してきたものである。

2. 実験調査

本実験に使用する余剰汚泥は、表1に示した成分を含有する都市下水汚泥を、4日間減圧発酵し、その間、80℃以上の温度で30時間以上を経過させ、その後、発酵槽より取出し、1ヶ月以上後熟させ、アンモニア臭

* 京都大学農学部農芸化学教室助教授

〒606-01 京都市左京区北白川追分町

** 東京大学融合サイエンスグループ代表

〒113 東京都文京区本郷7-3-1 (工学部電気工学科内)

表1 乾燥物としての発酵汚泥の成分組成

成分	含有率 (%)	濃度 (ppm)
全窒素 (T-N)	2.5	
全リン酸 (T-P ₂ O ₅)	1.5	
カリ (K ₂ O)	0.15	
カルシウム (Ca)	20.0	
マグネシウム (MgO)	0.5	
全炭素 (T-C)	28.0	
鉄 (Fe)	4.5	
亜鉛 (Zn)	0.1	
カドミウム (Cd)		0.2
クロム (Cr)		0.8
鉛 (Pb)		0.9
水銀 (Hg)		検出せず

や、その他の揮発性悪臭を全く感じさせなくした良質の物である²⁾⁻⁴⁾。

2.1 キュウリの実験

実験条件は、キュウリの5年間の連作ハウスを使用して行なう。対照区は、窒素 (N)、リン酸 (P)、加里 (K) の比が10 : 10 : 10の粒状化成肥料を、毎m² 当り300gを施肥した。他方、発酵汚泥処理区は発酵汚泥を毎m² 当り300g施肥し、N、P、Kの施肥量を均一にする為に、それぞれ単肥として、硫酸、過リン酸石灰、塩化加里を加えて、その比を10 : 10 : 10に調整した。

2週間後、キュウリの幼植物は対照区と発酵汚泥処理区に、それぞれ12m²の面積を割当て、その中に30株づつを3月25日に定植した。調査試験を始めるに当たり、初期条件として農薬施用や、蒸気滅菌操作等は、試験区域に対して全く行なわなかった。

その結果対照区での生育は、処理区に比べて栄養生長の時期から連作障害の影響で悪く、実験途上の5月中旬過ぎには急に発病した。従って、それ以後の実験の継続は意味を余り持たないので中止した。その結果は、表2に示す如く、収量で大きな差を認める事ができた。尚、5月31日の時点でも、発酵汚泥添加処理区では、萎凋する等の発病症状が認められず、開花し、着果し、更に生長し、果実肥大を続けていた。

2.2 トマトの実験

トマトの生育実験は、連作2年目の少し連作障害を現わしたところで、即ち、対照の非連作土壌に比較して30%減収したところで、連作3年目の栽培を行った。露地で5月20日定植した以外は、キュウリの実験と同じ実験条件で同様に行なった。その結果は表3に示す通りである。

表2 キュウリの栽培試験成績

区	収穫量 (本数) 5月10日迄	収穫量 (本数) 5月31日迄	収穫の総重量 (kg)	1本当りの重量 (g/本)
対照区	183	381	49.07	87
処理区	255	675	107.0	115

表3 トマト栽培試験成績

区	収穫量		7月31日迄	8月31日迄
	個・g	個数(個)	重量(g)	重量(g)
対照区	個数(個)		38	75
	重量(g)		5650.0	13132.5
	平均重量(g)		148.6	175.1
処理区	個数(個)		49	126
	重量(g)		7520.0	22430.0
	平均重量(g)		153.4	178.0

対照区は連作症状が現われ、発酵汚泥処理区に比べて収量は著しく減収した。

対照の無機肥料施用区は連作障害菌増殖の為、生育が悪く、8月中旬には発病する株が次々と現われ、半数以上が8月末までに枯死寸前の状態に落ち入った。他方、処理区は対照区に比べて耐病性に対して比較的強く、30株中2株だけが8月末迄に萎縮し始めた。従って、実験をそこで打切った。

次に連作障害の主な原因を調査する為に、対照区、並びに、発酵汚泥処理区から土壌のサンプリングを行い、シャーレの寒天上でコロニーを採取し、病原菌の同定、並びに拮抗関係の実験を行なった。その結果、前述したキュウリとトマトの実験の連作障害に対する主な原因は、植物病原性菌のFusarium oxysporumである事を確認し、更に、植物病原性フザリウムに対して、発酵汚泥処理区には拮抗する細菌や放線菌が多数増殖している事実も確認した⁴⁾。

2.3 要旨

下水処理汚泥を減圧発酵し、完熟化したコンポストは、植物病原性菌を死滅、溶菌させる作用のある事が明確化され、更に、実際圃場でそのコンポストを施用する事により、キュウリやトマトの連作障害が抑圧できる事も調査実験で証明された。

3. 水稲多収穫

本章は、前章に記述した表1の発酵汚泥を水田に施用し、これ迄の水稲収穫量を飛躍的に増収した技術について報告する。

3.1 水稲栽培法

供試試験区は老朽化水田を5アール ($a = 100\text{m}^2$) 単位で、プラスチック製“なみ板”を用いて深さ2mまでを仕切り実験に供した。この試験区は海岸に近く、水の移動がほとんど無い、老朽化水田である。従って、水稲の幼稲形成期に硫酸還元菌に依存して発生する硫化水素 (H_2S) によって、根が著しく障害を受ける土壌である。そこで、 H_2S の発生を抑制する為の調査実験として、出穂3週間前に、活発に増殖する光合成細菌 (ChromatiumとRhodospseudomonas capsulata)、毎g当り 10^9 細胞の生菌体培養液を、毎10a当り1kg投入した2連刺の区が設けられた。

尚、表5の収量の表示は、i) 対照区 (慣例栽培の無機化学肥料区)、ii) 処理区A (発酵汚泥区)、iii) 処理区B (発酵汚泥+光合成細菌施用区) を各々2区用意し、その平均値で表示した。

3.2 施肥法

対照の無機化学肥料施肥区は慣例に従い、基肥として5月1日に、毎10a当り10kgの複合化学肥料 (N:P:K=10:10:10) を、更に、穂肥として、毎10a当り5kgを追肥した。発酵汚泥堆肥施用処理区は、水稲収穫後の秋期、土壌に発酵汚泥を毎10a当り1000kg施用しておき、更に、翌春3月、再び同量の発酵汚泥を施用した。この際、発酵下水汚泥は表1に見るようにK成分が不足しているので、珪酸カリ毎10a当り1kgを当て、対照区とは異なる4月5日に発酵汚泥堆肥鋤き込みと同時に施用して、幼苗を移植した。水稲の品種は“ササニシキ”を使用した。

3.3 育苗実験

早植えによる効果の理論的背景を知る為、次のような基礎実験を行なった。

日本の4月上旬の西南暖地に於いても気温は 10°C 以下になる事があり、水稲にとっては低温すぎて生長に支障をきたす事がある。そこで、そのような低温障害を起す時期に、根の生長に対して発酵汚泥の堆肥と無機化学肥料のみの施用とを比較した時、どのような差違があるかを調査し、低温に対する理論的考察を加える事にした。

実験調査の条件は、水稲種子を過酸化水素 (H_2O_2) 溶液で滅菌処理をした後、温度に対しては、常温 20°C で3日間と低温 7°C で1日間の周期を繰返し、光の照射に対しては、日当り人工照明を12時間と暗状態を12時間に設定して、水稲根の発芽とその生育状況を観察した。

表4 水稲培養液組成

塩類の量 (mg/ℓ)		成分量 (mg/ℓ)	
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	48.2	N	23.0
		$(\text{NH}_4 - \text{N})$	(10.2)
		$(\text{NO}_3 - \text{N})$	(12.8)
MgSO_4	65.9	P_2O_5	13.0
KNO_3	18.5	K_2O	17.2
KH_2PO_4	24.8	CaO	20.5
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	59.9	MgO	22.1
Fe-citrate	3.0(Fe_2O_3)		

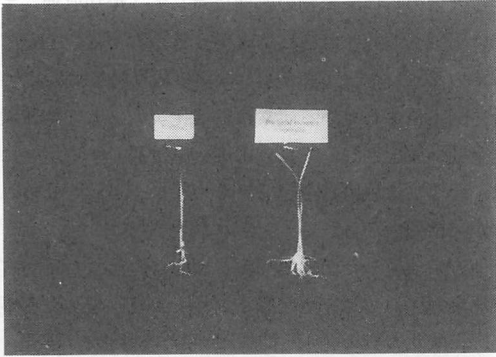
付記：1) ケイ酸ナトリウムを SiO_2 として150mg加える
 2) 溶液のpHは、5.2
 3) 微量要素としてMnを0.1mg、Bを0.05mg、Cu・Zn及びIを各々0.002mg加えた
 4) 水道水を使用した
 5) 処理区の追肥用肥料として、上記無機肥料液にNとして毎ℓ当り3mgのアミノ酸・低分子量核酸 (比率1:1) を加え、その10倍濃縮液を栄養生長期に数回にわけ、合計毎10a当り20ℓを追加し、また、出穂期の穂肥として毎10a当り10ℓを追加した (市販の光合成細菌体をこのアミノ酸・核酸液に溶かし、その菌体懸濁液として使用すると大変に便利である。)

根全体の生育状況を観察する方法は、寒天培養を用いて栽培し、又、根毛の発育状態を観察する方法は、ガーゼに肥料成分を吸収させたところで生長させ、光学顕微鏡で観察した。

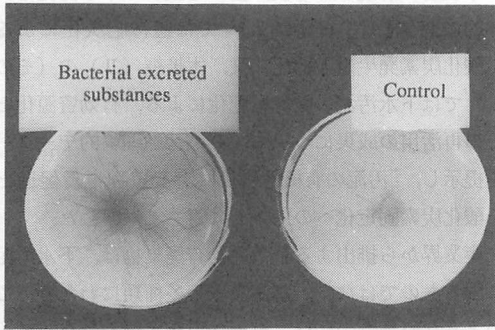
発酵汚泥堆肥処理区については、その堆肥を 45°C の温水に懸濁し、12時間後遠心分離をし、水溶性有機物やその他ミネラル成分を抽出した上液部を使用した。その上液部は無機肥料成分としての、N、P、Kがそれぞれ濃度20ppmになるように調製されている。尚、表4は水稲培養液組成の無機肥料成分を示す。

3.4 結果とその考察

無機化学肥料施用の対照区に於ける水稲幼植物は、堆肥抽出液処理の物に比べて生長がよくない。特に根の生長の悪い事が、写真1に見るように観察された。この事は顕微鏡観察による写真2を見るとよく理解できる。対照区の物は、主根がやや太いものの、根毛数が非常に少なく、根全体としての生長が貧弱であった。他方、抽出液中の有機物による効果と考えられるが、処理区のもは主根が対照区に比べてやや細いものの、根毛数が非常に多く、栄養成分吸収に寄与したことが窺える。このような事実から、無機化学肥料区の物に比べて、発酵堆肥を使用した早植え区の物は、低温期に於ける障害を乗り越えて根が深く生長し、次節の3.5の栽培実験に於ける写真3の如く、立派な根になり収量増加に結びついたものと推察した。



a) 左側：無機化学肥料のみ施用
右側：発酵堆肥抽出液施用



b) 左側：発酵堆肥抽出液施用，寒天培地の底面より観察
右側：同じく無機化学肥料のみ施用

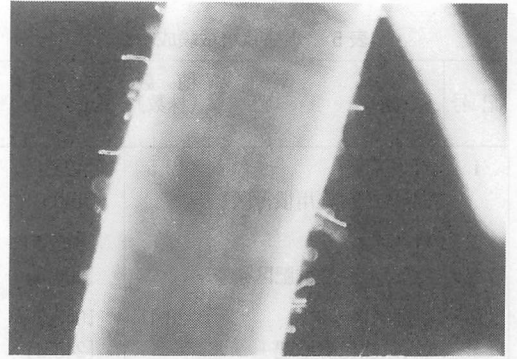
写1 寒暖処理（7℃と20℃）した水稲根の生育

3.5 栽培実験

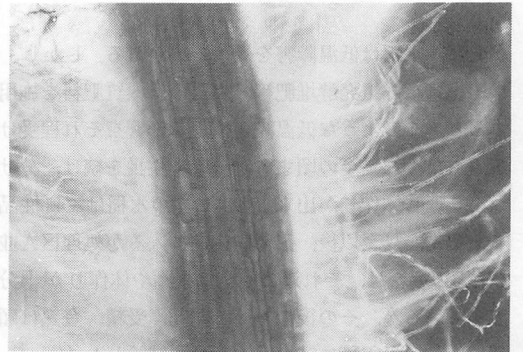
好気発酵汚泥堆肥処理区は、慣行例の無機化学肥料施用対照区の物より約1ヶ月前に早植えしても、その後の低温障害を余り受ける事もなく、移植した幼植物総べてが生長した。対照区に比べて、処理区の水田土壌の地温は、平均1.5℃高く、そして、微生物数は毎g当たり平均 10^2 細胞多く、根の生長の非常によい事が写真3に見るように認められた。

表5は収穫量の結果を示す。処理区Aの収量が対照区に比べて、非常に高い事が認められた。そして、幼穂形成期に光合成細菌を投入した処理区Bは、硫化水素による害作用が軽減され、更に増収できる事が確認できた。そして、その後の追認試行によれば、処理区Bの場合、年々増収し、3年後の収穫量は3.2倍にも増収できていることを付言しておく。

日本の西南暖地でも4月初旬は、天候不順になる事



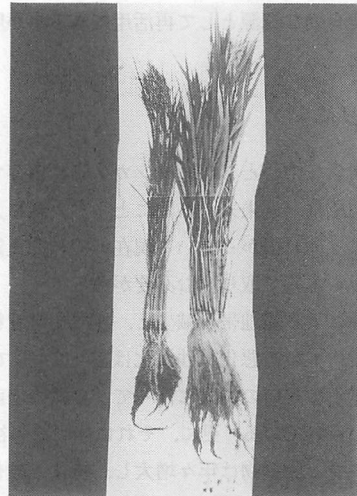
a) 無機肥料施用



b) 堆肥抽出液施用

[主根はa)に比べてやや細いが、根毛の数は多く、非常によい生育を示している]

写2 水稲幼植物の根の光学顕微鏡写真（200倍で観察）



左側：対照区，右側：処理区
左側の対照区の根は硫化水素等の害作用を受け、処理区のものに比べて根の生育は貧弱である

写3 無機化学肥料対照区（慣行試験区）と好気発酵堆肥施用，早植区の水稲生育状況（7月中旬）

表5 水稻栽培試験成績

記号	施肥	穂数 (株数)	玄米の重さ (kg/10a) [指数]
i	対照区 (無機肥料施用慣行区)	12.5	425.1 [100.0]
ii	処理区A (好気性発酵堆肥区)	27.5	877.4 [206.3]
iii	処理区B (嫌気性発酵堆肥+ 光合成細菌施用区)	28.1	1056.7 [248.4]

があり、水稻は低温障害を受ける事がある。しかし、水田土壌へ好気発酵堆肥等、良質の有機質肥料を施用すると、そのような低温障害による影響をそれ程受ける事もなく、夏至の頃まで十分栄養生長を続け、分けつを繰返して体作りが出来上る。日本の水稻は短日性品である為、夏至以後、生殖生長期に入るが処理区A並びにBの場合は、それ迄に健全な根圏や体作りが十分出来ている為、その後の出穂、開花、受精、登熟は順調に進み、多収穫に結びつくものと結論した。

即ち、日本では下水汚泥を含む、社会から排出される有機物を厄介物扱いしてきているが、それらを好気発酵する等、田畑で栽培されている農作物の根に障害を与えない微生物相に変化させ⁴⁾、植物根が受付ける、決して根腐され等を起さないような状態に相変化させれば、大変有効な資源として再活用できる事が明確に実証された。

4. おわりに

二酸化炭素を中心としたメタンガス等に依存する地球温暖化現象は、近未来の人類にとって大変に大きな課題として、申し掛かっている現在、その抑止策について、今から本腰で取り組む必要がある。

森林伐採による緑地帯の減少と、無機化学肥料多施用による農耕地の劣悪化・砂漠化は益々拡大している。他方、地球上の人口の増大に伴って、食糧の増産は余儀無く強いられている。更に、それに伴うその社会活動から発生する廃棄物は年々増大し、特に二酸化炭素の発生量は年々29億トンづつ地球を包む大気中に排出され、蓄積されている。従って、このような大変に大きな課題は人類の生存に対して早急に“バランス”のとれた、持続可能な繁栄に結びつける必要がある。

今日迄、衛生工学分野の専門家は人間社会から排出

する大量の有機廃棄物の処理に対して、焼却処理、または田畑へ還元すれば良いという考え方で支配をしてきている。しかし、言う迄もなく焼却処分をする場合、折角固定化されている炭素は二酸化炭素として地球環境空間へ放出され、また、田畑へ直接還元する場合には、農作物は根腐れを起し、その収量を減収させられるか、枯死させられる。

他方、前述した2例でも良く理解されたように、有機廃棄物に対して好気発酵という、少し手を加える事が、二酸化炭素の発生を抑制し、また農耕地の劣悪化・砂漠化への拍車に対し、逆に劣悪化土壌を蘇生させ、植林への生長促進効果はもとより、再び食糧増産の持続可能な農林資源へと再活性化を可能にする。

本展望・解説では今後、益々増大する下水汚泥を具体的に取り上げ、前編(Ⅰ)²⁾では植林肥沃化による二酸化炭素発生量の抑圧、又、本後編(Ⅱ)の(その1)では下水汚泥の発酵堆肥化による、有効資源化とその再活用の成果について、その基礎理論的データを提示し、「汚泥の有機肥料化による植物生長促進と二酸化炭素固定化への効果」に対して考察した。

産業界から排出する有機高含有廃棄物は、下水汚泥に限るものではなく、畜産糞尿等多種類にわたる。このような廃棄物中には、有害な重金属類を含有していない物も多く、有益菌を含む発酵堆肥に変えるだけで、その堆肥の使用は、更に、農産物の品質向上にも顕著な効果を表示する。例えば、糖度上昇による良好な味覚、カロチン等の色素の増加による良好な色つや、ビタミンその他健康に必要な含有成分の増大、そして低温障害や腐敗等に対する耐病性等々にその効果は顕著に明確に表示する⁵⁾。

本前後編の成果が二酸化炭素の発生や、その他地球環境空間にまで大きく影響を与えている廃棄物を有効なエネルギー・資源として、持続可能な人類生存と、その繁栄に結びつくまで利用発展する事を期待する^{6)~10)}。事実、その行為は、既に実行段階に入っている事を付言する。

文 献

- 1) 小林達治; 世界の土壌汚染・環境問題とその対策、環境技術, 17巻4号(1988), 217~221.
- 2) 上野 勲, 小林達治; 汚泥の有機肥料化による植物生長促進と二酸化炭素固定化への効果の考察(Ⅰ)植林への有機肥料効果の期待, エネルギー・資源, 13巻6号(1992), 509~514.
- 3) 吉田忠幸; 微生物による環境制御・管理技術マニュアル,

- 環境技術研究会編 (1983), 383~388.
- 4) 小林達治, 木村紫晃, 久米恒平, 牧 孝昭; 発酵汚泥の植物病原性菌に対する抑圧効果, 並びに植物生長促進効果について, 微生物と資源 (微生物資源利用研究会) 2号, (1980). 29~33.
- 5) 小林達治; 根の活力と根圏微生物, 農山漁村文化協会.
- 6) M. Kobayashi and T. Yoshida; Recycling of organic waste materials, Proc. International Symposium, "Solar Energy Bioconversion", (U. S. S. R.) (1983), 277~294.
- 7) M. Kobayashi, M. Suzuki, T. Yoshida et al.; Role of soil microorganisms and the utilization, Proc. International Symposium on soil biology and conservation of the biosphere (Hungary) (1985), 27~30.
- 8) H. Hirotsani, M. Suzuki, M. Kobayashi et al.; Destruction of fecal coli-phage during the composting process of porcine feces, Soil Sci. Plant Nutr, 34, (1988), 467~469.
- 9) M. Kobayashi; Role of photosynthetic bacteria in fowl watar purification, Progress Water Technology (U. K.) 7, (1975), 309~315.
- 10) M. Kobayashi, K. Fujii, I. Shimamoto and T. Maki; Treatment and re-use of industrial waste water by phototrophic bacteria, Progress water Tech. 11, (1979), 279~284.

他団体ニュース

“募集”——地球環境技術に関する国際共同研究チーム

＜目的＞ 地球環境保全のための優れた研究を行う「国際共同研究チーム」に対して研究費を助成することにより, 地球環境産業技術の国際的向上を図るとともに国際的研究交流を推進しつつその研究促進に寄与すること

1. 申請対象となるチームの主な要件

- ①構成する研究者が原則として4名以上
- ②構成する研究者の国籍が2か国以上
- ③構成する研究者の所属機関 (共同研究を実施する研究機関) が複数国に存在
- ④構成する研究者の中から研究代表者及び会計担当者を定めること (兼任可). 会計担当者は国内機関に属し, 日本語が堪能であること.

2. 応募期間

平成5年2月25日～平成5年5月25日 (必着)

3. 助成対象分野, 助成金額等

- ①地球環境の保全, 改善に関する基礎研究
採択件数: 2件
助成金額: 2,400万円/件 (程度)
- ②地球環境の保全, 改善に資する石油代替エネルギーの製造, 発生若しくは利用に関連する技術 (発電への利用に関する技術を除く) の実用化に関する研究
採択件数: 2件
助成金額: 3,000万円/件 (程度)

※注(1) 本事業は, 通産省の施策の一環として, 新エネルギー・産業技術総合開発機構と共同で実施しています.

(2) 助成金額, 採択件数は変更される場合もあります.

■ 問い合わせ及び申請書類送付先

財団法人 地球環境産業技術研究機構 (RITE) 研究企画室 研究調査課

〒600 京都市下京区塩小路通烏丸西入 新京都センタービル4F

TEL 075-361-3611 FAX 075-361-5607