

植物生産・利用技術の俯瞰

ー社会ニーズの充足に資する植物科学技術の視点よりー

平成20年3月



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
生物生産・利用技術横断グループ

Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

目 次

はじめに

I	俯瞰マップ	1
II	社会ニーズの充足に資する植物科学技術研究開発課題	5
1.	食料生産	5
(1)	概要	5
(2)	課題提案の理由	5
(イ)	安全な作物の安定供給技術の確立	5
(ロ)	医薬品代替作物等の高付加価値作物の創成	6
(3)	食料生産に係る技術俯瞰マップ	7
(4)	課題解決に資する研究開発	8
(イ)	遺伝子組換え技術	8
(ロ)	ゲノム育種技術	8
(ハ)	栽培・管理技術	9
2.	有用物質・エネルギー生産	10
(1)	概要	10
(2)	課題提案の理由	10
(イ)	バイオマスからのバイオ燃料生産技術の確立	10
(ロ)	植物由来のプラスチック原料等有用物質生産技術の確立	11
(3)	有用物質・エネルギー生産に係る技術俯瞰マップ	12
(4)	課題解決に資する研究開発	13
(イ)	有用物質生産に適した植物の育種	13
(ロ)	高効率の糖化技術	13
(ハ)	糖からの変換技術	14
3.	環境保全	15
(1)	概要	15
(2)	課題提案の理由	15
(イ)	植物利用による環境修復緑化技術	15
(ロ)	生態系保全に資する多機能型緑化技術	17
(3)	環境保全に係る技術俯瞰マップ	19
(4)	課題解決に資する研究開発	20
(イ)	植物利用による環境修復緑化技術	20
(ロ)	生態系保全に資する多機能型緑化技術の開発	20
III	検討の経緯	23

はじめに

数万年前に確立された植物の栽培技術が古代文明の出発点の象徴の一つとして語り継がれているように、植物生産・利用技術によるイノベーションは我々人類に計り知れない恩恵をもたらしてきた。近年においても緑の革命に代表される主要作物の栽培技術、植物等が堆積した化石資源の利用技術、画期的な新薬の原料供給に寄与した代謝制御技術、そしてバイオマスエネルギー生産に不可欠な糖質変換技術など、社会を変貌させたイノベーションに繋がる植物科学技術には枚挙に暇がない。

一方、最近では、世界のあらゆる地域において食料問題や環境破壊など、持続可能な社会への実現に対して警鐘を鳴らす地球規模の様々な課題が顕在化してきている。例えば、増加の一途をたどる発展途上国の人口に対して必要な食料は十分に生産できてはいない。また、先進国を中心とした食品の健康被害の問題も顕在化してきている。さらに、化石資源の利用による温暖化ガスの放出とそれにとまなう気候変動が年々深刻化しており、根本的な打開策を見いだせずにいる。これらの課題解決のために、現在また、我々は植物科学技術に関するイノベーションに大きく依存せざるを得ない局面にきている。

本報告書では、上記のような課題解決に対して、植物が寄与できる技術を「技術俯瞰マップ」として取りまとめた。マップの特徴は、「食料生産」、「有用物質・エネルギー生産」、「環境保全」という植物生産・利用の中心的な出口となる3つの社会ニーズを取り上げ、基礎的な技術から、育種、栽培・管理、利用に至る関連技術を網羅的にマッピングしている点にある。また、併せて国際的に緊急性が高く、早急に着手すべき課題を上記3つのニーズごとに複数取り上げその研究戦略も記述している。記述にあたっては、マップ上にある技術の中から特にボトルネックとなっているものを取り上げ、それらを解決するための研究開発課題を示した。

本報告書にある課題は、植物の生産や利用技術のみで解決されるものとは考えていない。しかしながら、全てのニーズが植物なしには満たされないことから植物科学技術がその中核となることは間違いない。

我々は本俯瞰マップが我が国の研究開発の施策立案等に活用され、提案にあるいくつかの研究開発が、種々の研究機関において実施に至ることを願う。提案する技術は、地球規模の課題解決の一助になるとともに、持続的な社会の発展に寄与するイノベーションの礎となる可能性が極めて高いと考えるからである。

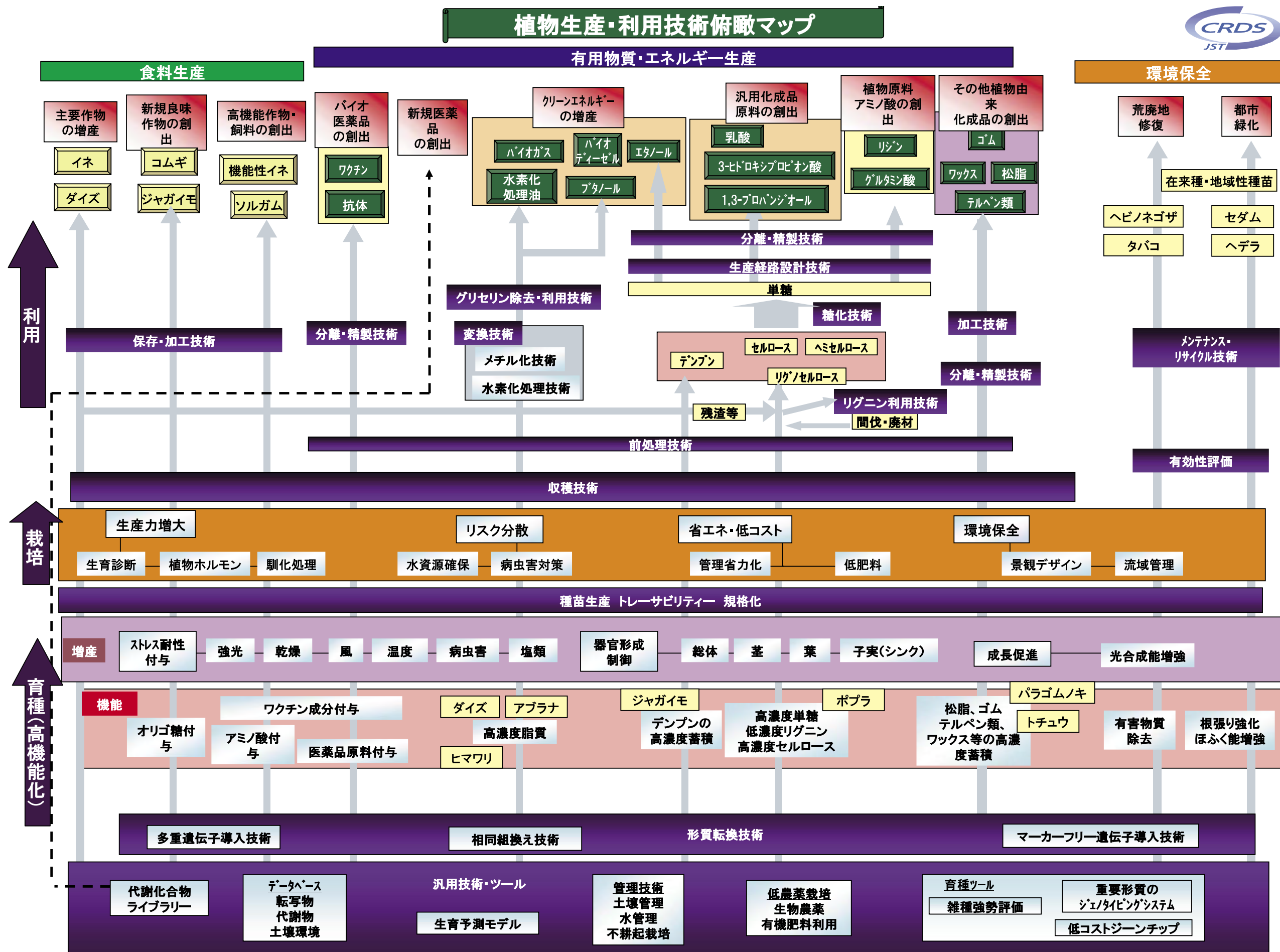
I 俯瞰マップ

次ページに様々な社会ニーズを充足する植物生産・利用技術の全体像を示した。

マップの最上部には、地球規模で問題が顕在化しており、特に早急の対策が必要な課題を列挙している（図中の赤色）。植物科学技術が寄与する社会ニーズは多岐に亘るが、ここでは、発展途上国等で大きな問題となっている食料問題や昨今急激に需要が見込まれているバイオエネルギーの生産、悪化の一途を辿る地球環境に関する課題を主として取り上げた。

またこれらの課題解決に資する技術を主に濃青色で図中に示した。植物（作物）生産の一般的な流れは、マップの最下部にある遺伝子組換えをはじめとする汎用技術や育種技術等を利用して目的とする機能（同桃色、紫色）を人為的に付与または改変することが出発点となる。植物ゲノムの解読が急速に進む中、これらの技術は日進月歩で進化し、新機能作物の作出が相次いで発表されている。今後はさらなる技術の高度化に加え、社会受容の観点に立った作物の安全性に関する評価技術などの需要が高まることも考えられる。植物の利用に関しては、生産した植物を目的とする資材やエネルギー等へ変換するために多くのステップが必要となる。このような中で、バイオマスを利用したエタノールやプラスチックの開発においては、多糖を単糖に変換する「糖化」に関して低コストかつ高効率を実現するための技術開発が国として取り組むべき重要な課題である。また環境保全に対する植物科学技術についても期待が大きい。特に汚染土壌の修復や生態系の緑化に関する寄与は他の技術との融合により大きな効果が期待されるため、本マップと併せて本文中にも詳細なマップを設け解説をしている。

注：マップ上に各種課題に対して寄与が大きい代表的な植物を例示している（同黄色）。



Ⅱ 社会ニーズの充足に資する植物科学技術研究開発課題

1. 食料生産

(1) 概要

発展途上国における食料不足による飢餓、エネルギー作物と食用作物との競合問題、機能性食品の摂取による健康被害など、我々人類は、世界的に食料の量と質に関する様々な課題に直面している。

例えば食料不足については、地球上の急激な人口増加と、干ばつや豪雨等の極端な気候による作物生産の阻害が同時多発的に起こり、アフリカ諸国を中心に飢餓等の深刻な問題を招いている。また、バイオエタノール等に代表される石油代替エネルギーの需要拡大に対してトウモロコシ等主要作物のデンプン質利用が広がり、作物価格が高騰している。さらに、質に関しては健康食品の機能異状や冷凍食品の汚染など、食品が関係する健康被害が多発しており、食品の信頼が揺らいでいる。

以上のような状況を踏まえ、本章では、特に緊急を要する食料生産に関する課題解決に向け、植物、とりわけ作物の遺伝子機能改変を基軸とした以下の2つの研究開発を提案する。

(イ) 安全な作物の安定供給技術の確立

(ロ) 植物成分の改変による高付加価値作物の創成

(2) 課題提案の理由

(イ) 安全な作物の安定供給技術の確立

アフリカ諸国を中心とした発展途上国における慢性的な食料不足は、急激な人口増加、乱開発、および気候変動等による作物生産量の低下が原因と言われている。国連のWFP（World Food Programme）によると、2005年の1年間で飢餓とそれに関連する疾病等で600万人以上の人々が死亡しており、特に北朝鮮、ハイチ、アフガニスタンなどの地域とサハラ砂漠以南のアフリカ諸国で深刻な問題となっている。¹

このような状況下で、我が国をはじめとした先進国がまず着手すべきは、主要な穀物であるイネ、ムギ、芋類を十分かつ安定的に供給するための技術開発である。この技術を早急に確立し、上記途上国へ供与することにより、一刻も早く食料供給体制を整える必要がある。特にこれらの地域では、乾燥や寒冷等の気候や酸性・塩基性となった土壌等の栽培環境が作物供給の大きな障害となっているため、このような特殊環境下で十分に生育可能な品種を作出し、収量を格段に向上させる技術開発が急務となろう。本課題ではこのような技術として、最新のゲノ

¹ <http://news.bbc.co.uk/2/hi/africa/4347194.stm>

△情報を活用した育種技術や、工学で培われた技術を活用した栽培技術に焦点を当てる。また、新規作物の作出にあたっては、組換え作物のヒトに対する安全性や生態系に対する影響についての評価技術も研究対象とする。

（ロ）植物成分の改変による高付加価値作物の創成

先進国、発展途上国を問わず、植物成分を改変した高機能、高付加価値作物の需要が急増している。これは、分子生物学の進展により確立された技術によって新規組み換え作物の作出が可能となりつつあることが背景にある。その方向性としては以下の3種類の作物に大別できる。すなわち、①デンプンやタンパク質等の栄養素の含有比率を高めた高栄養化作物、②作物等に医薬品の成分を含有させた医薬品代替作物、③作物の味を改変させた新規良味作物である。

①については食料自給が十分にまかなえない国々において、栄養素の割合を向上させた作物に対する期待が大きい。上記（イ）でも述べたように、発展途上国においては、主要穀物の絶対量の不足にともなう死者が続出しており、量の確保が喫緊の課題であることに言うまでもない。しかしながら、作物あたりの栄養価を高めることは少量の摂取で十分量の栄養素を確保することが可能となるため、本作物が量の問題を補える可能性は高い。また、②、③については、先進国等においてニーズが大きい。②については、予防医療の観点から通常の食事等を通じた健康維持や増進に対する意識が各国で高い。我が国でも花粉症の症状を緩和する米や免疫機能の向上作用を持つ苺の開発など次世代の遺伝子組換え作物の作出が相次いで発表されている。③の例としては、日本の代表的な作物ブランドである「コシヒカリ」やリンゴの「富士」が中国やロシア等において高値で取引されている実績が挙げられる。また日本の企業から糖度を高めたムギが作出されるなど、植物種によっては世界を先導する技術が創出されている。

(3) 食料生産に係る技術俯瞰マップ

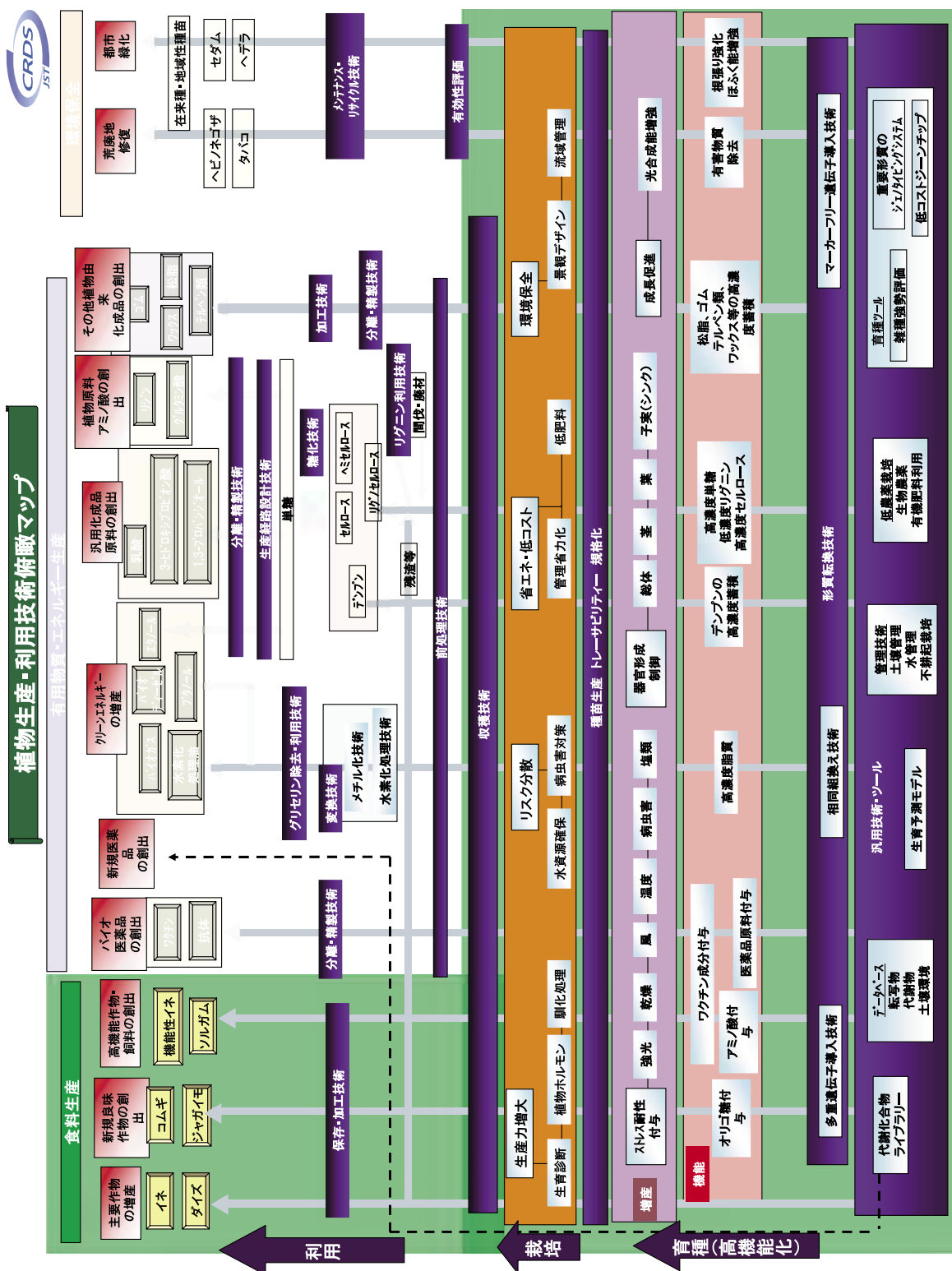


図 食料生産に係る技術俯瞰

食料生産に係る研究開発フローを俯瞰マップ中にハイライト(緑色)した。増産や高機能化を目的とした作物生産の一般的な流れは遺伝子組換えによる種苗生産、有種技術による新機能付与、栽培技術による収量増というステップを踏む。それぞれの技術の向上は見込まれるが、これらの技術を作物種毎に並行して確立することが、課題解決の近道であることは言うまでもない。

(4) 課題解決に資する研究開発

以下に(2)で挙げた課題解決のためのボトルネック技術を列挙しそれに資する研究開発課題を記述する。

(イ) 遺伝子組換え技術

遺伝子組換え技術は、本来その植物に備わっていない形質をウイルス等のベクターを用いて導入する技術で、作物の増産や新規高付加価値作物の作出において中核的な技術といえる。これまで、単一の遺伝子を特定の作物種に対して導入する技術についてはいくつかの植物種において確立されてはいるが、環境耐性や栄養素の付与など、多くの形質を同時に導入する技術が未熟であるため、真に有用な作物を十分量作出することができない。今後、様々な問題に直面する食料生産に対して本組換え技術は無限の可能性を秘めていることから、新規技術の開発と高度化は極めて重要な課題といえる。

本技術の問題点を以下にまとめる。

- 薬剤耐性遺伝子を除去することが出来るマーカーフリー遺伝子導入や、複数の遺伝子を安定的に導入出来る多重遺伝子導入の技術が未確立である。
- ゲノム上の任意の部位に遺伝子を挿入する相同組換え技術がほとんどの種において確立されていない。

上記問題点の解決のためには、下記の例にある研究開発課題の推進が有効である。特に我が国はイネゲノムの解読において世界を先導した実績があることから、イネ科作物（ムギ類、トウモロコシ等）に着目し技術開発を行うことが効果的と考える。

- 導入したウイルス粒子等の植物個体内における動態解析（組換えベクターの安全性評価技術）
- 導入遺伝子のジーンサイレンシング機構の解明
- 複数の遺伝子を同時に導入するための新規ベクター開発

(ロ) ゲノム育種

育種とは、多収や良味等の作物の創出を目的に、「交配」により有用形質の選抜を行う技術である。近年、植物ゲノムの解読と交雑技術の向上により、これまで偶然の発見にしか依存できなかった作物の品種改良が、必然としてその有用形質を操作し、また改良に要する時間を飛躍的に短縮することが可能となっている。ここで提案するゲノム育種とは、このような遺伝情報を基に、同系統の品種間の「交配」による有用遺伝子の選抜を基本とする技術である。本技術の特徴は、自然交配の概念に基づいた技術であるため、外来遺伝子を人為的に導入する組換え技術に比べ、社会受容性が高く、懸念されている生態系への影響も少ないことが挙げられる。本技術における現在の問題点は以下の2つに集約される。

- 病害虫等に対する耐病性作物の開発は精力的に進められているが、耐冷性・耐塩性・耐乾性等、環境適応型の作物についてはほとんど開発されていない。
- 多収性に関する多くの形質が見出され、研究室レベルでは多くの新規作物の栽培に成功しているが、実際の圃場での展開が遅々として進んでいない。

今後、上記問題解決のために特に重要となる研究開発は、品種間のゲノム情報を比較することにより、多収や耐病等に関する因子のさらなる探索を行い、これらのゲノム上の位置から最終的な形質に関わる遺伝子群、Quantitative trait locus (QTL) の挙動を解析することである。また、雑種強勢等の遠縁のもの同士の交配により遺伝形質が強化される仕組みを解明し、これを育種技術として活用することも重要である。研究開発戦略においては品種の選定が重要となるが、わが国ではイネゲノムに関する成果の蓄積が他国に比べ突出していることから、本課題においてもイネ科を中心とした作物の研究展開が効果的であると考えられる。

- イネ科の雑穀等に潜在する環境ストレス耐性遺伝子の解析
- イネを中心としたイネ科植物の QTL (量的形質座位) 解析
- 雑種強勢機構の解明とこれに基づく育種技術の開発

(ハ) 栽培・管理技術

農業における次世代の栽培・管理技術には、作物の生産性の向上と併せて、土壌汚染の回避、水資源等の有効利用など環境負荷低減を同時に実現することが求められる。

このため本課題では、従来の生産方式にセンサー技術、情報通信技術、ロボット技術等、工学分野の先端技術を導入した栽培・管理システムの構築を行い、消費エネルギーを抑えつつ高収量を目指す新しい生産体系を提案する。例えば、作物の生育に影響を及ぼす環境要因の詳細なモニタリングを圃場内の多地点で行い、これに基づいた最適な散水、施肥等による合理的かつ環境低負荷型の栽培・管理システムの構築などが例として挙げられる。

具体的な研究開発課題の例を下記に示す。これらの研究開発の推進においては、工学で培われた先端技術を作物生産システムに応用するため、農学と工学の融合が鍵を握っている。日本は、従来センサーやロボット等の基盤技術の開発に強みがあることから、これらを活かした融合研究を早急に立ち上げ、世界を先導する作物生産システムの確立を行うべきと考える。

- 土壌・作物・大気間の媒介因子の複雑系解析
- 作物生育関連因子の高度センシング技術の創出
- 圃場情報に基づいた統合的栽培管理システムの構築

2. 有用物質・エネルギー生産

(1) 概要

温室効果ガス削減や限りある化石燃料資源を節減するため、バイオマスエネルギーの有効活用が世界的に重要視されてきている。

すでに化石燃料からバイオマス資源への転換を目的として、サトウキビやトウモロコシ由来のバイオエタノール、なたね・パーム由来のバイオディーゼルは、欧米やブラジルを中心に政策誘導型の市場導入が図られている。一方で、これらのバイオマスは食料と競合するため、バイオマスエネルギー生産への利用促進が、食料価格の高騰を招く要因となっている。そのため、今後は食料と競合しない草本や木質などのバイオマス資源の有効活用が求められると考えられる。

このような背景にあって、植物の生産・利用技術の進展への期待は大きい。長期的には荒廃地での生育が可能な非食料系のエネルギー作物の育種やその栽培技術の開発、処理が難しいリグニンの含量が低い木質系バイオマスの開発などを検討することが重要となる。一方、短期的・中期的には、現在入手可能なバイオマス資源を如何に効率的に糖化し、得られた糖を目的とする生産物に効率的に変換する微生物を造成することがポイントとなる。したがって、少しでも利用しやすいバイオマス植物の育種や目的とする物質の蓄積量を高めた植物の育種を継続することが重要である。

本章では、温室効果ガス削減と化石燃料資源の節約という緊急課題の解決に向けた以下の研究開発を提案する。

(イ) バイオマスからのバイオ燃料生産技術の確立

(ロ) 植物由来のプラスチック原料等有用物質生産技術の確立

(2) 課題提案の理由

(イ) バイオマスからのバイオ燃料生産技術の確立

バイオマスは生物起源の有機性資源で、原理的には太陽エネルギーによって固定された炭化水素であり、生物によって化学的に固定された太陽エネルギーと言える。再生産が保証されている限り、大気中の二酸化炭素を増加させることがないため、カーボンニュートラルの性質を持つとされ、温室効果ガス排出削減に有効であり、かつ太陽が存在する限り枯渇しないため化石燃料資源の節約にも寄与できると期待されている。このような理由から、温室効果ガス削減と化石燃料資源の節約に資するバイオマスエネルギーの利用技術に注目が集まっている。

バイオマス利用におけるエネルギー生産の流れは、利用しやすい植物の育種、バイオマスから糖への変換、変換された糖をさらに目的とするバイオ燃料に変換するというステップを踏む。植物の育種に関しては、イネを中心に蓄積されてきた知見を活用した実用植物での展開が見込まれる。また、バイオマスから糖への

変換に関しては、構造生物学における先端の解析技術を活用することにより、従来とは異なった視点からの酵素改変などが期待される。また、糖からの変換技術に関しては、我が国が優位性をもつ発酵技術に最新の代謝物解析技術を組み合わせることにより、独自性が高く、経済的な波及効果が見込める幅広い応用展開が期待される。

(ロ) 植物由来のプラスチック原料等有用物質生産技術の確立

環境調和型の循環型社会の実現に向け、生分解能を有する工業原料は極めて大きな魅力を持つ。また、特に世界レベルで化石資源の消費量が急増するなか、これと代替可能な植物由来工業原料（汎用工業樹脂等を含む）には大きな期待が寄せられている。このような背景から、我が国においても多くの企業や大学等の研究機関において、サツマイモやトウモロコシからバイオプラスチック等を生産する研究開発を積極的に展開しており、いくつかの製品が既に製品として市場に投入されている。しかしながら、それらの製品は全プラスチックの一部に過ぎず、真に石油を代替する汎用材料として浸透するレベルにはない。この理由は、素材の強度や生産コスト等の障害が大きいことであり、原料である植物組成の改変、糖質成分の変換技術等のさらなる高度化と低コスト化が必要となる。

本提案では、このような観点から、バイオプラスチック原料やゴム、パラフィンなどの炭化水素生産効率が高い植物育種とその変換技術にフォーカスし、植物資源に恵まれ、成果が活用される場の有力候補であるアジア諸国と緊密な連携をもった取り組みに重点を置く。また、シロイヌナズナやイネ等のモデル植物で得られている多くの知見を、物質生産研究の対象となる実用植物に展開することも重要であると考ええる。

(3) 有用物質・エネルギー生産に係る技術俯瞰マップ

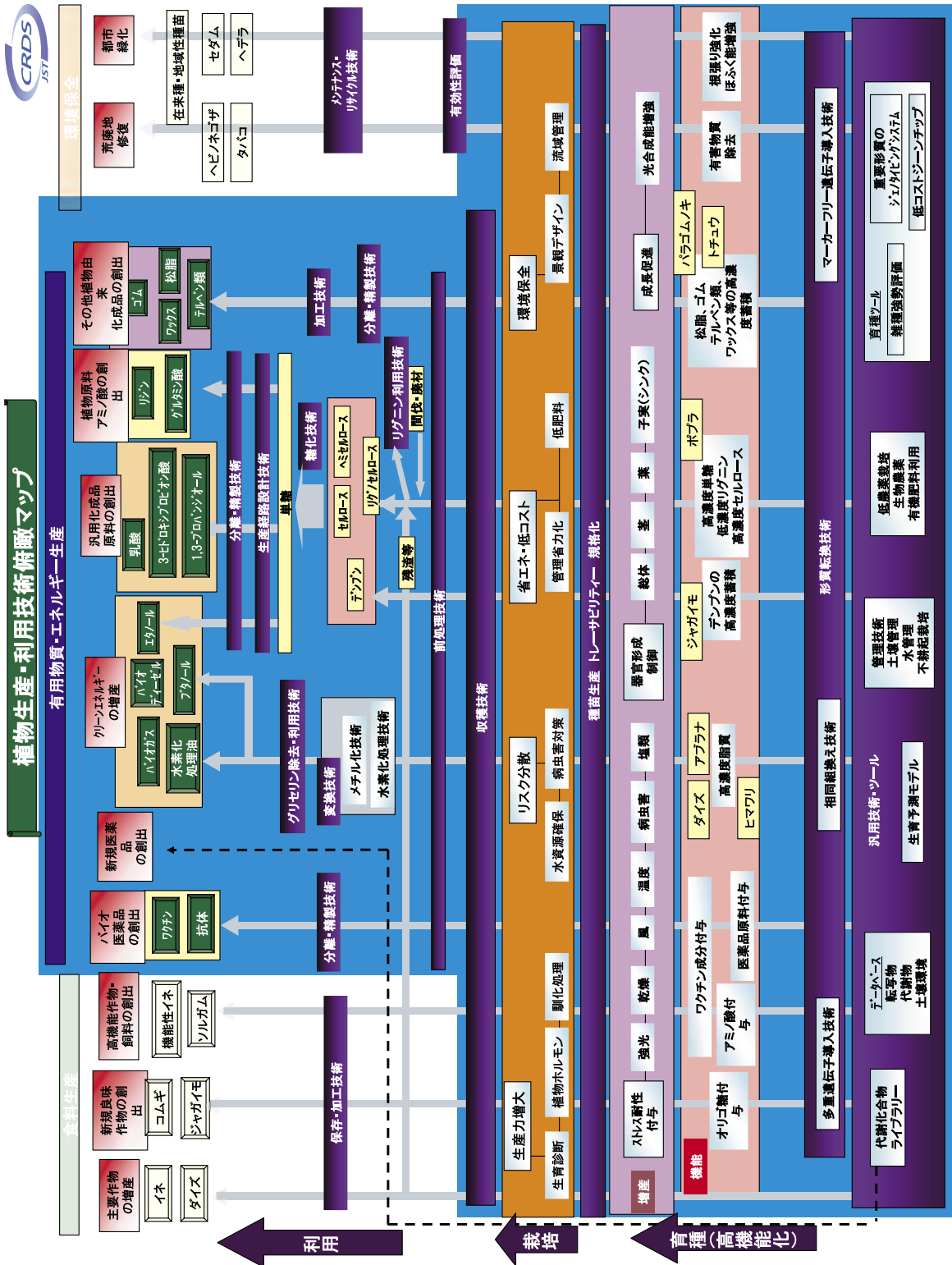


図 有用物質・エネルギー生産に係る技術俯瞰

バイオマスを原料とした有用物質・エネルギー生産においては、原料となる植物の育種、抽出した多糖の変換、糖の有用物質への変換など様々な技術が存在する（青色）。本章では主に原料となる植物の変換技術に着目し、重要な課題を取りあげた。

(4) 課題解決に資する研究開発

植物による有用物質・エネルギー生産技術は、その原料となる植物成分の改変や育種など多くの技術が食料生産技術と重複する。よってここでは、本課題固有の技術のうち特に重要と考えられるものを取り上げ記述することとした。

(イ) 有用物質生産に適した植物育種

物質生産における植物生産・利用技術は大きく2つに分けられる。すなわち、植物自身が生産する物質を個体内で蓄積させる技術と植物成分の微生物変換を前提とした植物組成改変技術である。

いずれの場合にも、植物個体内の代謝経路における酵素活性を制御することにより、代謝産物の変化を的確に把握し、目的とした物質生産に最適な植物を作出することが重要となる。例えば、植物個体内で目的とする生産物の蓄積量を増大させる場合には、生成物がしかるべき蓄積器官（シンク）に貯蔵されるように制御することが求められる。よって、植物固有の形態形成や物質分配メカニズム（特にシンク器官の発達形成）を分子レベルで解明し、制御する技術確立が必要である。一方、セルロース等植物由来の原料を出発材料にして、微生物などによる変換を経て最終産物とする場合には、糖化の際に扱いやすい構造の細胞壁を有する植物の育種など、細胞壁合成に関連する代謝を改変した植物の作出などが重要である。

以下に具体的な課題例を列挙する。

- 代謝産物の個体内輸送システムの解明
- 植物のシンク形成機構の解明
- 細胞壁合成の制御機構の解明
- リグニン低含量植物の創出

(ロ) 高効率の糖化技術

近い将来、食料と競合しない非食料系バイオマスとして、草本や木質などの成分がエネルギーやその他化成品生産の出発原料となると考えられている。その場合、現在利用が困難とされている植物中のリグニンを効率的に除去し利用する技術と除去後のヘミセルロース・セルロースといったポリマーの利用技術が必要となる。現在、関連技術として、種々の酵素による生分解技術が存在しているが、使用する植物種によって多糖の構成比率が異なるため、万能な酵素となりえていない。よって多糖の組成に依存しない高効率分解酵素の創出が期待されている。また、酸やアルカリによる化学的な前処理と並行または併用した使用も想定されることから、酸性あるいはアルカリ領域で高活性を有する酵素や中和後の酵素処理に対応可能な高塩濃度対応酵素の創出も求められている。

以下にこれらに関連する研究開発課題例を示す。

- 各種生分解酵素の構造情報に基づく高触媒能酵素の創成
- 酸・アルカリ、高塩濃度耐性酵素の探索
- リグニン除去および有効活用技術の確立

(ハ) 糖からの変換技術

植物の糖質成分から有用物質を生産する際、現在、一般的にはその原料としてグルコース等 6 単糖が用いられている。しかしながら、今後利用が進むと考えられている木質系バイオマスは、キシロース等 5 単糖の含有率が高く、これらを利用した発酵技術の需要が高まっている。このため、本提案では、我が国が伝統的に強みを持つ発酵技術を基軸として、細菌や酵母による C5 糖を効率的に利用する技術を確立する。

本技術は、既に米国の大学等で微生物による変換技術が開発されているが、十分な変換効率が得られず商業化の妨げとなっている。本提案では従来にない画期的な技術を確立するため、微生物ゲノムや代謝などのインフォマティックスを駆使し、システムティックに代謝制御を行い、高効率の変換技術を確立する。

以下に具体的な研究課題を列挙する。

- C5 糖高効率変換微生物の創出
- 糖代謝経路のモデル化と検証
- 代謝経路におけるネットワークの定量化と制御解析

3. 環境保全

(1) 概要

本章では、様々な環境保全対策において植物自体が有する能力が大きな役割を担う緑化技術に注目し、今後我が国のポテンシャルを最大限活かしながら、優先的に取り組むべき課題を取り上げた。

第一に、植物利用による環境修復緑化技術が挙げられる。現在利用されている汚染土壌の主な浄化方法では、非常に複雑な処理工程が必要とされ、処理コストが高く、さらには土壌機能の破壊や二次汚染の懸念も生じる。そのため、植物の養分吸収能力を活用・強化した環境修復技術（ファイトレメディエーション）²に期待が寄せられている。このファイトレメディエーション技術の本格的な実用化のためには、浄化効率の劇的な向上、浄化効能の安定化などが必要である。

第二に、生態系保全に資する多機能型緑化のための技術が挙げられる。現在でも、状況に応じた様々な緑化技術が存在しているが、次の2つの課題を抱えている。まず、植物材料確保の観点から、種苗供給体制が確立している外来種が用いられることが多いことである。そのため、地域種苗の供給体制を確立するための栽培、管理するための技術や侵略性を抑制するための生態的、育種的研究の推進が必要である。二つめは、単一目的のための緑化から、多機能型緑化を実現するための緑化手法の開発が求められており、低負荷型緑化技術や生態系保全など複合的な効果を期待するための景観配置法の開発などが必要とされる。

(2) 課題提案の理由

人間と自然の調和、安全で安心な社会、持続可能な経済発展という我が国の社会ビジョン達成に向けて、植物科学の成果を活用した温暖化対策、大気・水・土壌などの保護、生態系修復などの技術が期待されている。そのため、本章では様々な環境保全対策において、特に大きな役割を担う緑化技術に注目し、社会ビジョンの実現に向けて、我が国のポテンシャルを最大限に活かしながら、優先的に取り組むべき2つの課題を取り上げる。

(イ) 植物利用による環境修復緑化技術

(ロ) 生態系保全に資する多機能型緑化技術

(イ) 植物利用による環境修復緑化技術

物質生産、吸収、代謝、窒素固定生物との共生による施肥効果など、植物の機能を利用した環境改変技術は荒廃した土地の修復に寄与している。近年、高度成

² 植物の有害物質の吸収・蓄積・分解等多様な機能を利用して、汚染された土壌・底質、水等環境媒体の修復・浄化技術

長期時代に設置された工場跡地や鉱山跡地周辺における重金属類等の無機汚染、焼却などにより生じるダイオキシン類、工業や食品工場などで生じる石油等有機汚染物等による土壌の汚染などが顕在化しつつある。また、国際的な基準値の変更に伴う Cd（カドミウム）等の有害金属への対応や、家畜の餌において発育促進や下痢予防の目的で使用される Cu（銅）や Zn（亜鉛）は、今後深刻な問題になる可能性がある。一方で、金属価格が高騰し世界的な資源獲得競争が行われており、土壌中に蓄積されたレアメタル・重金属を回収し、リサイクルする技術が求められるようになった。既存の土壌汚染対策技術、重金属回収技術のいずれにおいても、適用範囲の拡大、効果などの観点からさらなる技術革新が求められている。

現在利用されている主な汚染土壌の浄化方法は、非常に複雑な処理工程が必要とされる。例えば、現在主流である堀削除去、熱脱着、土壌洗浄などの物理化学的方法は短期間で浄化処理できるメリットはあるが、処理コストが高く（一件当たり 20～30 億円）、さらには土壌機能の破壊や二次汚染の懸念も生じるため、広範囲に広がるような汚染に対して適用することが困難である。そのため、植物の養分吸収能力を活用・強化した環境修復技術（ファイトリメディエーション）に期待が寄せられている。このファイトリメディエーション技術は植物の吸収によって環境汚染物質を低減する修復技術である。物理化学的手法に比べて適用可能な濃度範囲はやや狭く、即効性は必ずしも高くないという課題があるものの、初期導入コストが低く、持続性もある。また、植物が吸収・蓄積した物質を回収することができるのであれば、希少金属リサイクルのための技術としても役立てることができる。さらには、緑化／景観維持の観点からも有効であり、広範囲の土、水、空気的环境の保全・維持（環境悪化の防止）にも有用な環境低負荷型の技術と期待されている。

しかし、ファイトリメディエーション技術を本格的に実用化するためには、大きな課題が残されている。一つは対象物質を完全に除去することができず、浄化効率が低いことである。特に、根圏における微生物や根からの分泌物質の動態、有害金属吸収のメカニズムがほとんど解明されていない上、雑草化による他生物との交雑リスクを明らかにする必要があり、実用化に向けた技術的課題の検証もこれからである。また、現状では浄化の完了までに長い時間がかかることも問題である。さらには浄化効率が、植栽された土壌の土性や日照等の外部環境に左右されてしまうため、安定的な効果をもたらすための技術開発が必要とされている。

表 ファイトリメディエーションと他の環境修復手法の違い³

	ファイト リメディエーション	微生物によるバイオ リメディエーション	物理・化学的手法
コスト(初期コスト)	低い	やや高い	高い
適用可能な 濃度範囲	やや狭い	やや広い	広い
持続性	長い	やや短い	手法により異なる
即効性	低い	やや高い	高い
環境要因の影響	大きい	やや大きい	小さい
他生物相 との相互影響	少ない	やや多い	他からの影響は少ないが、 影響を与える可能性が高い
物質の回収と 再利用	可能	場合により可能	可能
組換え体の 導入・管理	容易	困難	—

(ロ) 生態系保全に資する多機能型緑化技術

都市域における快適な景観の創出から、地球温暖化ガス吸収源としての森林育成まで、様々な目的に対応するための緑化が行われ、同時に多くの緑化技術が創出されている。一方で、生物多様性に対する意識の高まりや規制の影響により、確立したはずの緑化手法にも変化が生じつつある。例えば、のり面の緑化においては外来生物法の影響を受け、主流の外来種から在来種を使うような緑化方法が注目されるようになった。さらに、緑化という行為は、実施方法によっては複数の効果をもたらすことも可能であるため、生態系保全、修復などの付加的な効果にも期待が集まっている。例えば、ヒートアイランド効果を緩和することを目的とする屋上、壁面緑化のための基盤技術はほぼ確立しているが、今後は同時に、鳥などに営巣地を提供することも期待されている。

このように、生態系保全に資する多機能型緑化技術の開発を行うことで、人間と自然の調和などの社会ビジョンが達成できるものと期待される。しかしながら、現状では、以下に述べる2つの課題を抱えており、それらを克服する必要がある。

まず、苗供給体制が確立している外来種を用いられることが多いため、導入した移入種が逸出し、地域の侵略種となり、在来の植物を駆逐するなどの問題が生じている。したがって、このような問題を避けるために、自生種（郷土種）の利用、確保、供給のための栽培管理技術に加え、遺伝子攪乱を回避するための技術開発が求められている。そのため、地域種苗を主な対象とする品質管理、トレーサビリティなどを含む栽培技術の確立、外来植物の侵略的性質を抑えるための

³ 寒地土木研究所 防災チーム 月報 (2007) 646: 42-45

選択、育種技術などが推進すべき研究課題といえる。

二つめには、緑化植物の導入による攪乱影響を軽減しながら、様々な機能を発揮するための緑化技術である。上述したように、深刻化するヒートアイランド効果を軽減するための緑化でさえ、景観保全や生物多様性保全において寄与するものとなりうる。例えば、二次的自然を利用する野生動物にとっては、食物となる果樹植物が緑化されることにより、生育地（ハビタット）としての機能を期待することができる。このように、緑化植物の導入による攪乱影響を軽減しながら、様々な機能を発揮するための緑化技術を確立するためには、埋土種子を利用した低負荷型緑化工法、複合的な効果を期待するための景観配置技術の確立などが必要である。

(3) 環境保全に係る技術俯瞰マップ

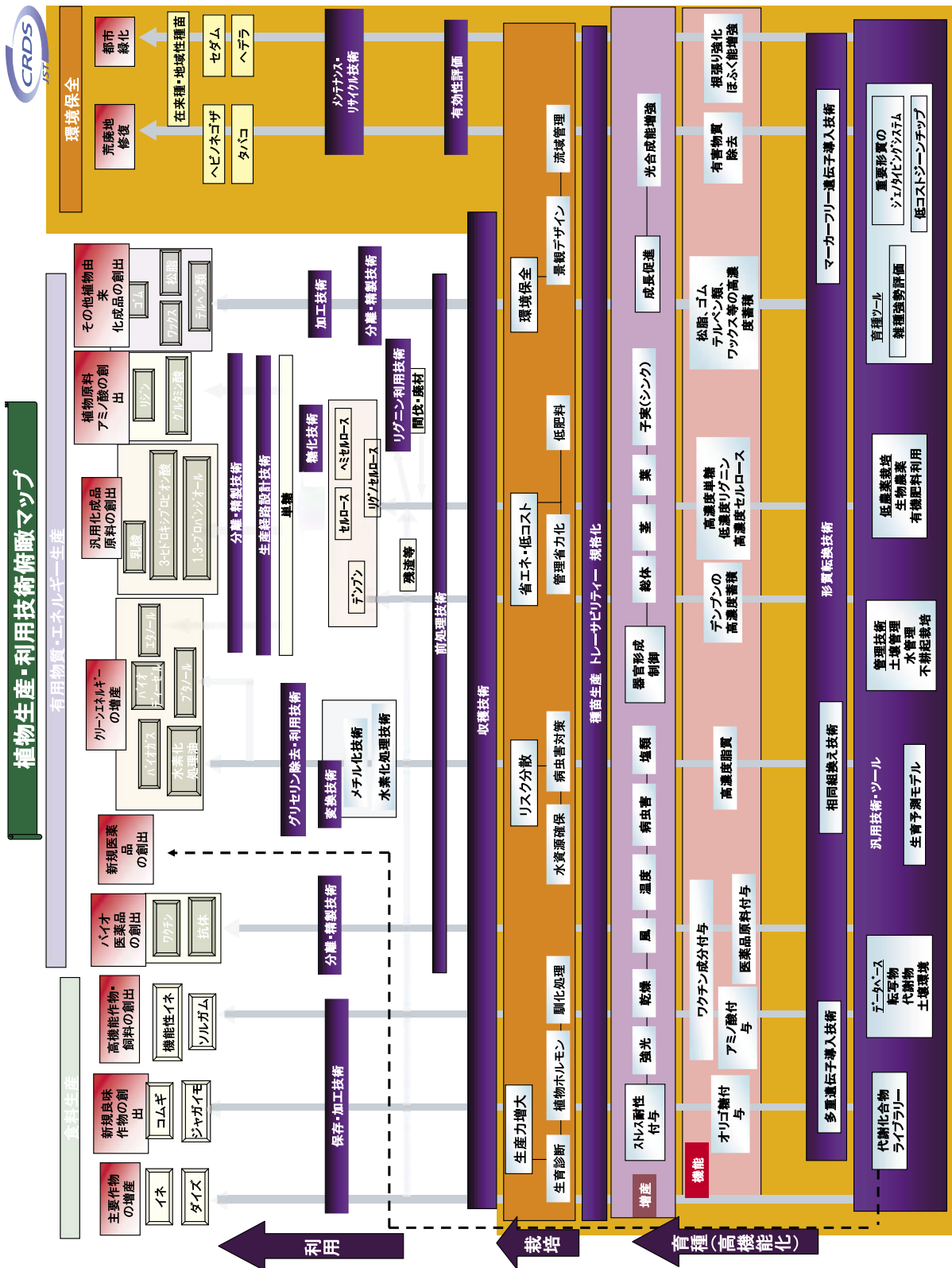


図 植物生産・利用技術俯瞰マップにおける環境保全の位置づけ。他と同様に環境保全に資する植物科学技術においても育種、栽培、利用のための技術が不可欠である。対象とする植物は目的、場所などに応じて検討されるべきである。

(4) 課題解決に資する研究開発

(イ) 技術俯瞰

課題解決に資するための研究開発フローと関連技術群を図（前ページ）に示す。生態系における人為影響を軽減し、修復するための手段として、いくつかの緑化技術が考えられる。例えば、道路や住宅などに関わる造成工事などにおける緑地保全、砂漠、崩壊地、荒廃した森林などの修復や復元、ビオトープなど、様々な場面に応じた技術が求められ、様々な緑化技術が発展している。これらの緑化技術には生態学的、工学的、栽培学的な手法に基づく植生管理技術、のり面緑化、屋上・壁面緑化、特殊環境地の緑化技術などがある。一方で、様々な緑化技術に必要な要素技術は、必ずしも独立したものではない。例えば、バイオテクノロジーに代表されるような植物の機能を改変する技術、農学として確立している栽培技術、化学的なアプローチを利用する処理技術、物理・化学・生物計測を用いた評価技術であり、生物学、農学、物理学、化学、工学などに基づいている。従って、温暖化対策、大気、水、土壌などの保護、生態系修復など、いずれの対策を実施するにおいても異分野間で連携しながら研究開発を行うべきである。

(ロ) 植物利用による環境修復緑化技術

本技術の中核を担うファイトレメディエーションは、対象となる汚染媒体、汚染物質及び活用する植物の能力により環境負荷物質の吸収、吸着・固定、代謝・同化・分解等の種々な修復機構に分類される⁴。いずれのプロセスもそのメカニズム、効果などについては、生物学、化学、農学的アプローチにより研究が行われている。

しかし、荒廃地修復を真に実用化するためには、上記の要素技術に加え、圃場や現場における土壌—根圏微生物—植物間の物質、水循環の把握が不可欠である。具体的には、土壌中の養分吸収を促す根粒菌などの微生物が植物根に定着したり物質の受け渡しを行うなどするプロセスやメカニズム、そして土壌水へ有害重金属溶解状態や植物が吸収・蓄積するメカニズムを評価できるようなモニタリング技術の確立が必要といえる。

以上をまとめると、植物利用による環境修復緑化技術を実用化させるために我が国が取り組むべき研究開発課題は以下のとおりである。

- 植物の重金属を高度に蓄積する代謝メカニズムについての研究
- 植物と養分吸収を媒介する微生物の相互作用解析
- 環境浄化能力を高めた植物の作出（外来性異物代謝能の強化、細胞培養法を用いた耐性株の選抜・育種なども含む）
- 土壌・植物中の「見えない」物質の挙動を可視化するモニタリング技術、

⁴ http://www.pref.saitama.lg.jp/A09/BA30/labo/report/AnnualReport_CESS/no3/2002_114.pdf

及びそれらを予測するシミュレーションモデルの開発

(ハ) 生態系保全に資する多機能型緑化技術の開発

緑化においては、事業計画上の制約などにより、安定供給が可能な外国産の種子や苗木を使用することが多い。しかし、外来種（侵略種）による生態系攪乱が懸念されるようになり、地域生態系固有の植物（地域性種苗）の重要性が高まっている。ところが、現在の日本においては地域性種苗や生態学的に安全性の高い緑化植物の供給体制が確立しておらず、緑化植物の繁殖、生育技術、品質管理技術、トレーサビリティ技術を確立し、新しい栽培方法の確立が求められている。一方で、のり面や荒廃地など、地域性種苗では対応できない事例も多いため、生態学的に安全性の高い緑化植物として、種子不稔系統、短命系統、環境選好性系統など、侵略的性質を抑えるための選択、育種技術も重要である。

環境アセスメントにおける環境保全措置（ミティゲーション）を生態系保全に資するものにするためには、攪乱影響を軽減しつつ、複数の機能を発揮するための緑化を行うことが重要である。例えば、施行する場所に存在していた植生（林など）をそのままのり面にはりつけるような技術、表土を回収、蒔きだしすることで、埋土種子を利用する技術、表土から種子を回収し、播種するような技術などが挙げられる。そして、緑化という人的行為により付加や攪乱を最小化し、複合的な効果を期待するための景観配置、管理技術の確立が求められている。

以上をまとめると、生態系保全に資する多機能型緑化技術を開発するために、我が国が取り組むべき研究開発課題は以下のとおりである。

- 地域種苗の供給体制を確立するための栽培、管理技術
- 侵略性を抑制するための生態的、育種的研究
- 埋土種子利用などによる低負荷型緑化技術
- 生態系保全など複合的な効果を期待するための景観配置、管理法の開発

また、上記課題を実現するためには、緑化効果を評価するためのモニタリング技術やシミュレーションモデルの開発、そして地域種苗の供給体制を安易的に運営するためのデータベースなど、情報基盤の構築も必要である。

環境保全のための植物生産・利用基盤技術

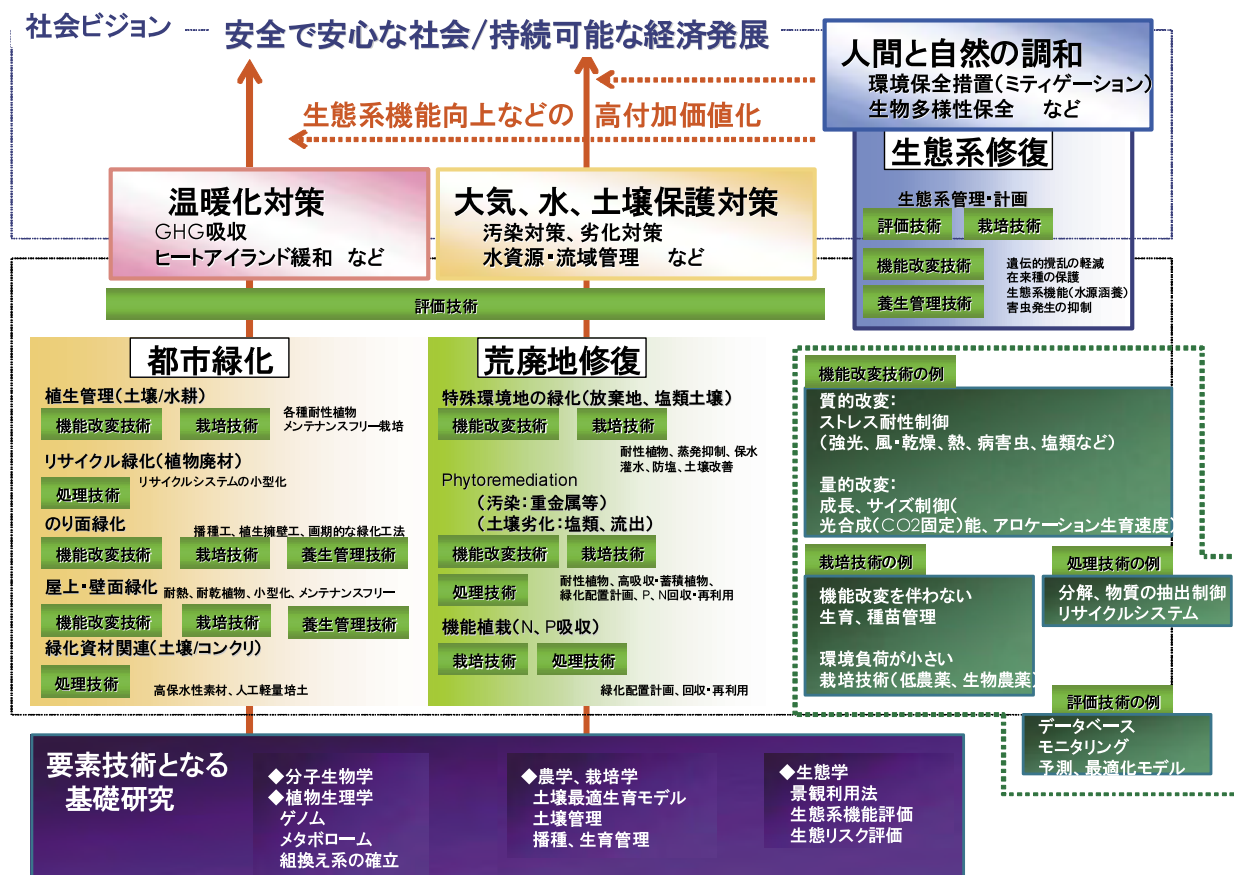


図 環境保全のための植物生産・利用基盤技術の俯瞰。環境保全に資する主な緑化の種類として、ヒートアイランド対策や景観整備などに資する都市緑化と、大気、水、土壌保護対策に資する荒地修復緑化がある。いずれも、要素技術となる基礎研究の成果がベースとなり、機能改変、栽培技術や処理技術や、それらの効果を明らかにするような評価技術がある。今後は、社会ビジョンの達成に向けて、目的(対策)を達成しながら、高付加価値化を実現する必要がある。

Ⅲ 検討の経緯

(1) 「生物生産」分野に関する科学技術未来戦略ワークショップ

〈概要〉

生物及び生物機能を活用した食料や有用物質などの効率的かつ安定的な生産に資する研究を「生物生産研究」と定義し、当該分野を俯瞰的に展望するとともに、新たなイノベーションの創出に資する研究課題・研究領域の探索を行った。

ワークショップは、平成 18 年 2 月 24 日（金）～25 日（土）に、奈良先端科学技術大学院大学の磯貝彰副学長（当時）のコーディネーターの下、当該分野の第一線で活躍している 21 名の有識者の参加により開催された。

その結果、我が国が重点的に推進すべき研究領域として 10 の研究課題・領域を抽出した。そのうち、植物の生産・利用に関係するものを以下に列挙する。

- 生物間相互作用に基づく次世代生物生産基盤技術の創出
- 体細胞の発生・分化過程におけるエピジェネティック制御による革新的植物生産基盤技術
- 植物の超多収・高機能化を実現するゲノム育種法の確立
- 草本系・樹木系分子素材の新エネルギー活用基盤技術

(2) 「Gene into Value Initiative」

—動植物の育種・物質生産の研究開発戦略— 植物分科会

〈概要〉

ゲノム情報（Gene）を活用し、高付加価値（Value）を有する植物を効率的かつ安定的に作出する技術のうち、特にボトルネックとなっている技術を抽出し、その技術確立のための研究開発課題の洗い出しを行った。

ワークショップは、平成 18 年 9 月 4 日（月）に、奈良先端科学技術大学院大学の磯貝彰副学長（当時）のコーディネーターの下、当該分野の第一線で活躍している 9 名の有識者の参加により開催された。

その結果、食料生産に関してはイネゲノムを活用した育種研究の重要性が挙げられ、特に雑穀等に潜在している有用形質の探索とそれを利用した環境適応型イネ科作物の育種に関するテーマ着手の緊急性が指摘された。

物質生産については、バイオエタノール用植物の育種戦略としてここでもイネ科植物の重要性が挙げられ、籾殻等も含めたホールクロップの利用促進技術の提案がなされた。また、エタノール変換における糖化技術についてはほぼ技術的には成熟していることが確認され、セルラーゼの高機能化に関する研究の重要性についての指摘があった。さらに、代謝産物の有効利用のためのメタボローム解析や植物細胞

を利用した医薬品原料等の物質生産技術について言及があった。

(3) 研究者インタビュー

〈食料生産〉

平成 19 年 4 月 25 日 岡山大学 武田和義 教授

平成 19 年 6 月 1 日 農業生物資源研究所 原田久也氏

〈有用物質・エネルギー生産〉

平成 19 年 5 月 10 日 東京大学 五十嵐泰夫 教授

平成 19 年 5 月 24 日 地球環境産業技術研究機構 湯川英明 グループリーダー

〈環境保全〉

平成 19 年 5 月 10 日 福山大学 大川秀郎 教授

平成 19 年 5 月 11 日 東京大学 西村拓 准教授

平成 19 年 5 月 14 日 東京農工大学 亀山章 教授

植物生産・利用技術の俯瞰
—社会ニーズの充足に資する植物科学技術の視点より—
CRDS-FY2007-WR-19
独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター
平成20年3月
生物生産・利用技術横断グループ

〒102-0884 東京都千代田区二番町3番地
電話 03 (5214) 7481
ファクス 03 (5214) 7385
<http://crds.jst.go.jp/>
平成20年3月

©2008 JST/CRDS

許可なく複写・複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

