

バイテク情報普及会

植物バイオテクノロジーが作る持続可能な社会

～遺伝子組み換え植物が可能にする
地球にやさしいもの作り～

平成20年12月8日（月）

奈良先端科学技術大学院大学

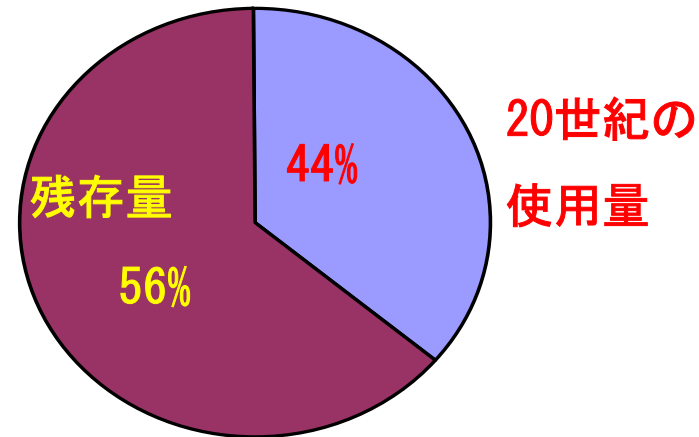
名誉教授 新 名 惇 彦

化石資源に依存した20世紀の文明の結果

総石油埋蔵量

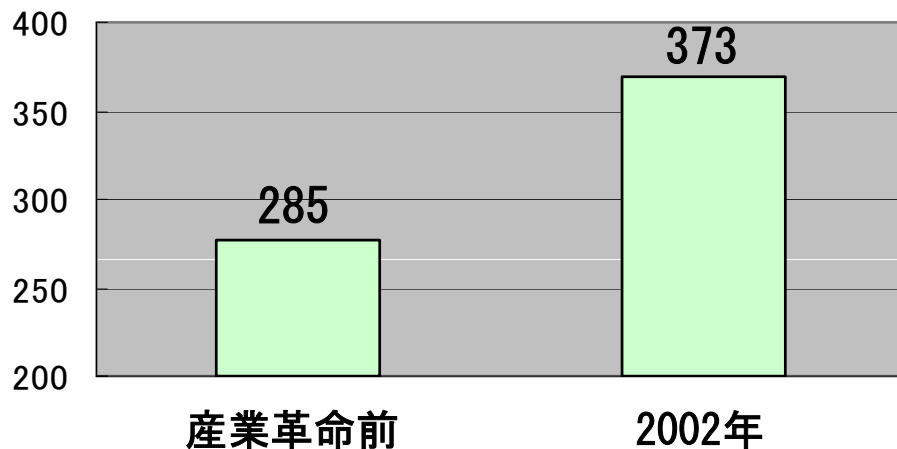
2,840億トン

(中世代から新生代第三紀の
1億3千万年かけて蓄積)



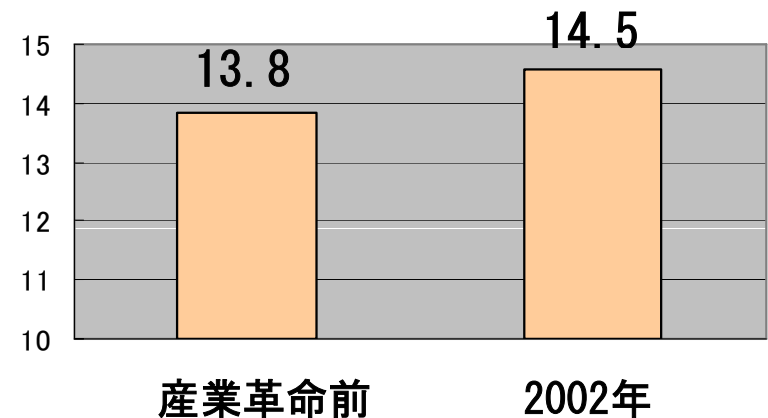
ppm

大気中のCO₂ 濃度



°C

地表の平均気温





Svante A. Arrhenius
(1859– 1927)

アウレニウスの定義

酸 : Hを持ち、水溶液中で H^+ を生じる物質

塩基 : OHを持ち、水溶液中で OH^- を生じる物質

アウレニウス の式 : $k = Ae^{\frac{-E_a}{RT}}$

1903年 第3回ノーベル化学賞受賞

1895年: スtockホルムの物理学会

On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon
the Temperature of the Ground

Philosophical Magazine and Journal of Science : April, p. 237–276 (1896)

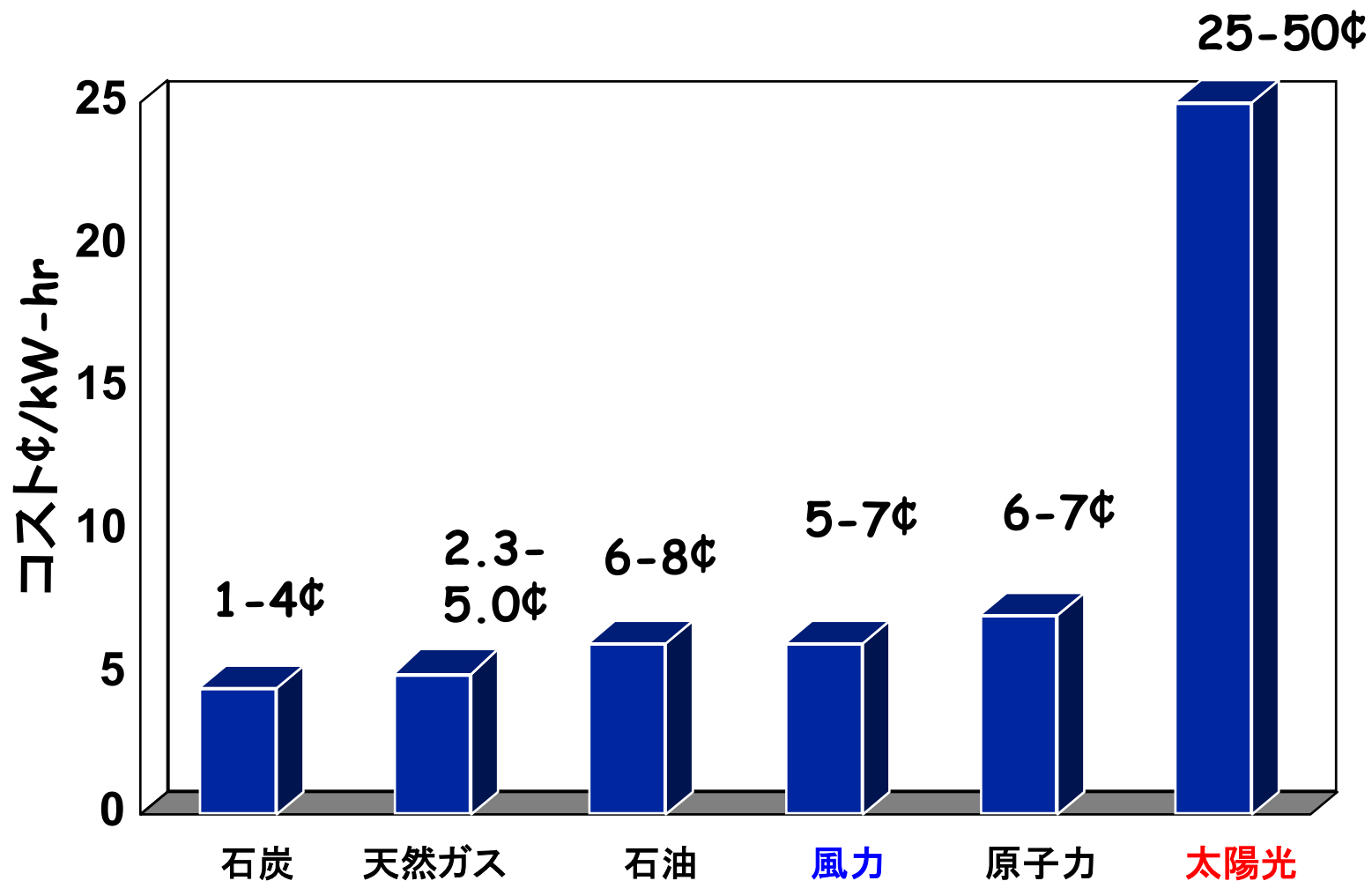
1895年の石炭使用量 5億ト→ CO₂が0.1%増大、2000年 石炭換算 80億ト

再生可能なエネルギー量

・ 現在の使用エネルギー	12 TW	化石燃料: 86% (10.3 TW)
・ 太陽	100,000	大量、分散、日・季節変動
・ 植物バイオマス	100	分散 (一部局在)、備蓄可
・ 地熱	10	一部局在
・ 風力	4	分散
・ 潮力・海流	2	分散
・ 水力	0.5	一部局在

有効エネルギーへの変換効率(獲得エネルギー／投入エネルギー)が最大課題

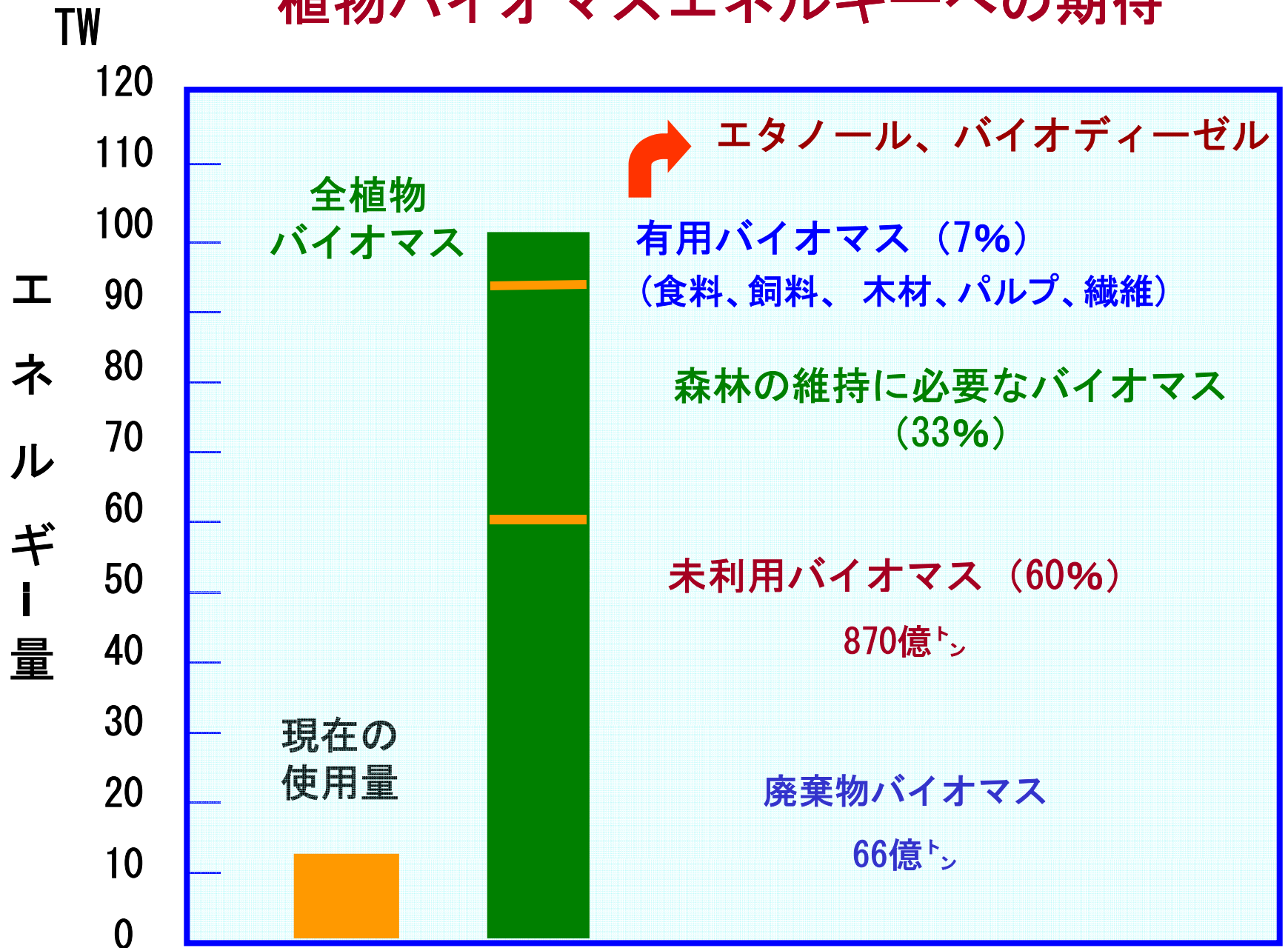
電力生産コスト (U.S. in 2002)



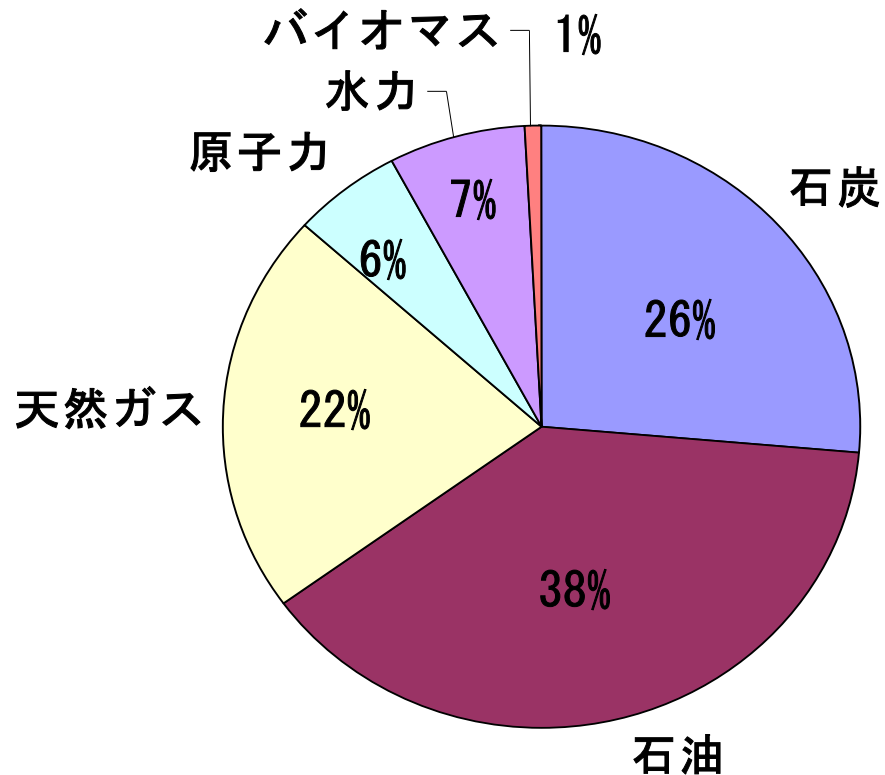
Courtesy of Nate Lewis, Caltech

C. Somerville (NEDO Workshop, Osaka, 2006, 9, 14)

植物バイオマスエネルギーへの期待



世界のエネルギー利用 (1990)



化石資源エネルギー : 86% (10.3 TW)

(IPCCレポート)

全植物
バイオマス
(100TW)

→ 10.3%増

有用バイオマス
(7TW)

→ 150%増

森林の維持
(33TW)

未利用バイオマス
(60TW)

燃料国策の歴史 ～近代国家の礎:液体燃料～

第1次世界大戦(1914-1918)

新兵器(戦車、航空機)の登場 「ガソリンの一滴は血の一滴」

独、仏、伊:燃料の国家統制

日本 直接、打撃を受けなかったため無関心

大正12年(1923) 外務省・大蔵省・陸軍省・海軍省・農商務省・国務院

石油政策に関する調査会設置。昭和5年(1930)まで、国内石油資源の開発、石油企業組織の改善、海外石油資源の確保、石油代用燃料工業の助成と研究助成を審議、実施せず。一般の関心は薄く、海外石油製品のダンピング市場と化す。

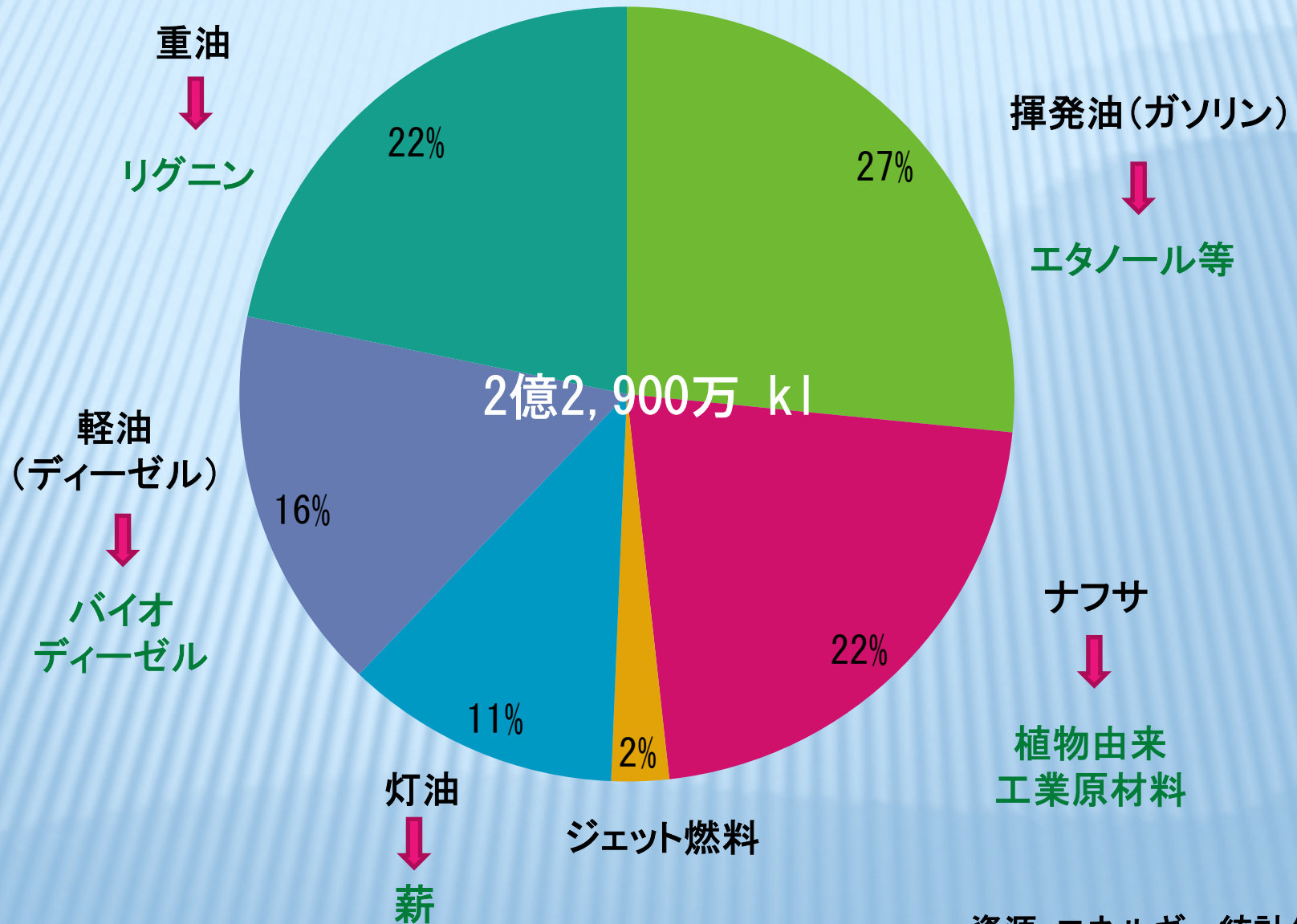
昭和 6年(1931) 満州事変勃発

昭和12年(1937) 燃料政策実施要綱

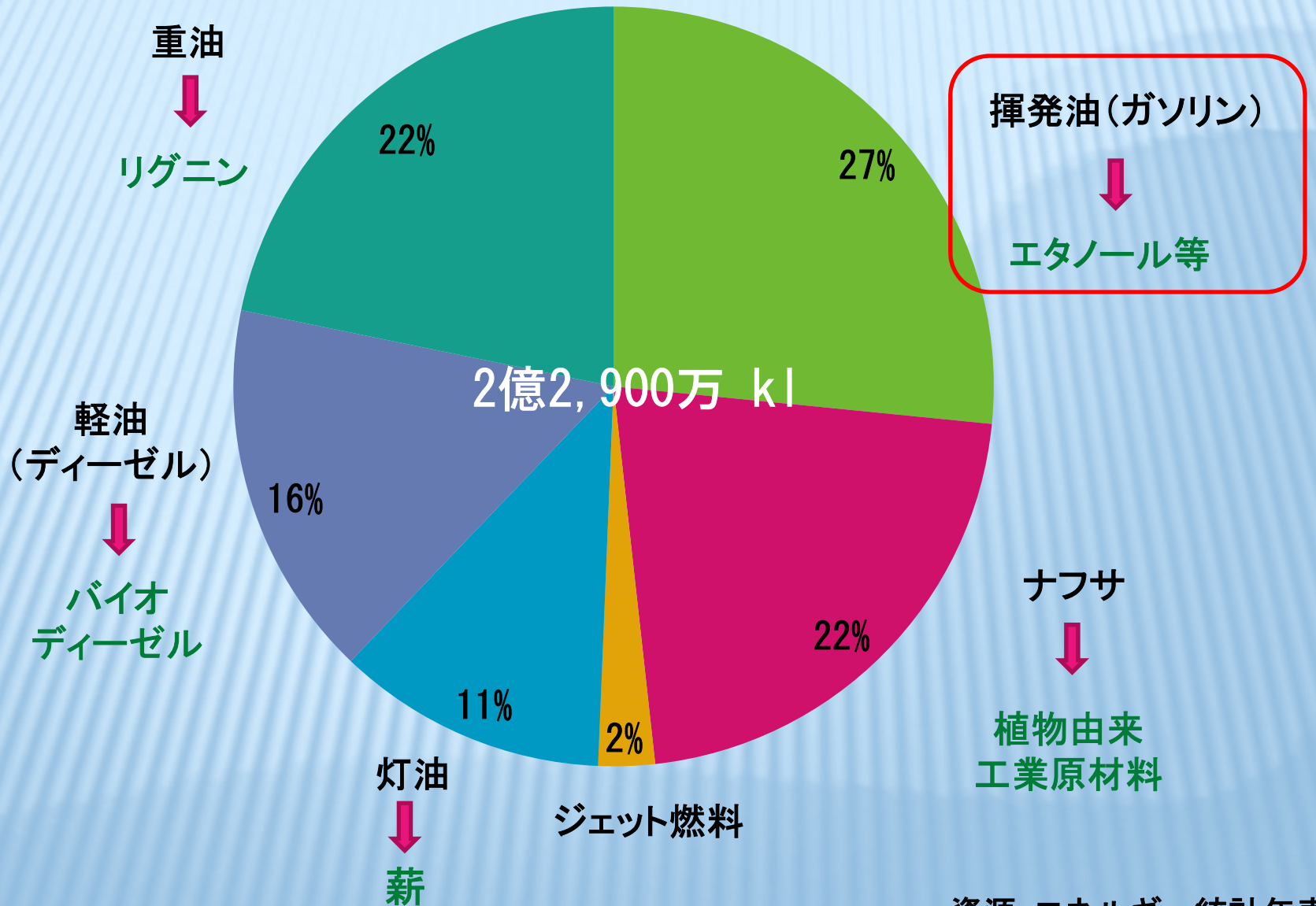
内外石油資源(含、北樺太)の開発促進、石油代用燃料工業の助成(石炭液化)、アルコールの混合使用の強制、燃料使用合理化(木炭・薪・ガス・電気自動車使用普及)、石油販売統制

昭和14年(1939)第2次世界大戦勃発、昭和16年(1941)日米開戦(真珠湾攻撃)

わが国の石油の用途(2006)



わが国の石油の用途(2006)



米国の政策



エタノールはガソリンより輸送用燃料として優れている

- ☆ 排ガスがクリーン: 硫黄を含まない、オゾン破壊の可能性が低い
- ☆ オクタン価、燃焼効率が高い
- ☆ 低揮発性のためスモッグを発生しない
- ☆ スパーク点火エンジンに適している
- ☆ 海洋汚染を引き起こさない(タンカー事故)
- ☆ 貿易バランスの改善(中東から\$240億輸入)、国内自給が可能
- ☆ エネルギー安全保障および中東からの原油輸送の難題を克服
- ☆ 農業経営力の向上

急成長した米国の燃料用エタノール生産

エタノール生産工場 (March 2006)

◆ 稼働中	94
◆ 建設中	35
▲ 計画中	71

2006年のエタノール生産量
約2,000万kl (ガソリン消費量の3%)
しかし、トウモロコシ生産量の20%

G. Somerville (NEDO Workshop, Osaka, 2006, 9,

ガソリンをエタノールに置き換えるには

	世界	日本
ガソリン消費量	26億kl (100%)	6,000万kl (100%)
デンプン生産量	28億トン	1,700万トン
エタノール生産量	18億kl (70%)	1,100万kl (18%)
未利用バイオマス	520億トン	2.2億トン
エタノール生産量	210億kl (800%)	8,800万kl (150%)
農林産廃棄バイオマス	43億トン	4,900万トン
エタノール生産量	23億kl (90%)	2,000万kl (33%)

未利用バイオマス: 原生林、雑木、雑草、廃棄物

農林産廃棄バイオマスは稲わら類似の組成と仮定

デンプン1トンからエタノール640 リットル

稲わら1トンからエタノール400 リットル

鍋島成泰: 植物代謝工学
ハンドブック (2002) より

バイオエタノール生産のエネルギー収率

投入エネルギー： エタノール生産に必要なエネルギー量
(栽培、輸送、発酵、濃縮、無水エタノール)

発生エネルギー： エタノールの燃焼エネルギー

	トウモロコシ (米国)	サトウキビ (ブラジル)	間伐材 (米国)	建築廃材 (日本)
発生/投入	1.27	9.20	2.08	2.40
濃縮エネルギー	石油	バガス	リグニン	リグニン

エタノールの最大の欠点

発酵での最大蓄積濃度 22% → 99%まで蒸留濃縮

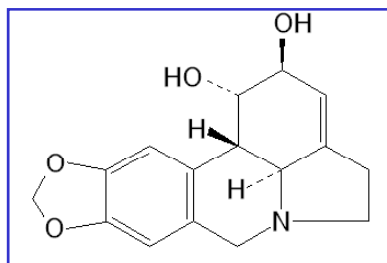
彼岸花球根のデンプン



球根（湿重量）
のデンプン
含量11.5%
1.5トン/ha

Lycoris radiata

ヒガンバナ科の単子葉植物



リコリン(licorine)

神経毒

• 日本の農地面積 467万ha

• 彼岸花栽培面積 200万ha

水田(254万ha)の1/2、畑(213万ha)の1/4

耕作放棄地(39万ha)の1/2

• デンプン生産量 300万トン

• エタノール生産量 190万kl

環境浄化水生植物

ホテイ
アオイ



バイオマス収量 106 トン(乾物)/ha/年
エタノール生産量 7.2kl /ha/年

窒素・リン吸収による水質浄化
(淀川、大和川、琵琶湖など)と
エタノール(300万kl)生産

ボタン
ウキクサ



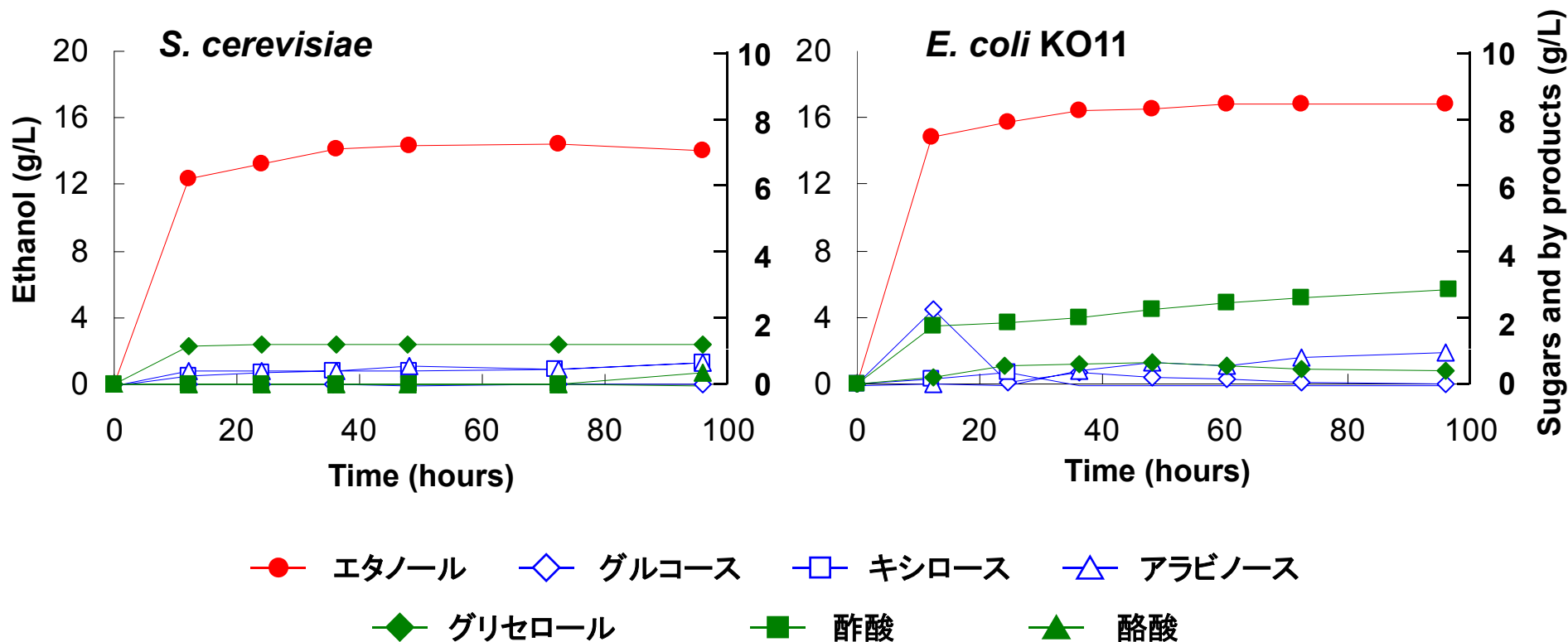
76 トン(乾物)/ha/年
10.8kl /ha/年

(阪大工
池 道彦)

特定外来生物 (水生植物 8種)

日本固有の植生と交替、希少固有種の絶滅
個人：300万円以下の罰金、3年以下の懲役
法人：1億円以下の罰金

ホテイアオイバイオマスからのエタノール生産



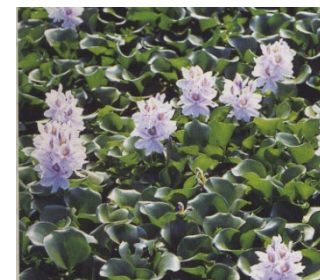
現状の最大効率 (SSF, *E. coli* KO11)

収率: 0.17 g-EtOH/g-biomass, 最終濃度: 17g/L, 変換効率: 126 % (glucose)

阪大工 池 道彦教授

わが国のガソリンを全てE30に

- ・ **稲ワラ**（全国） 多糖類 900万トン
 収穫期 9 - 10月 使用期間 9 - 3月
- ・ **彼岸花**（西日本） デンプン 1,000万トン
 収穫期 3 - 4月 使用期間 3 - 5月
- ・ **ホテイアオイ**（全国） 多糖類 1,050万トン
 収穫期 5 - 9月 使用期間 5 - 9月

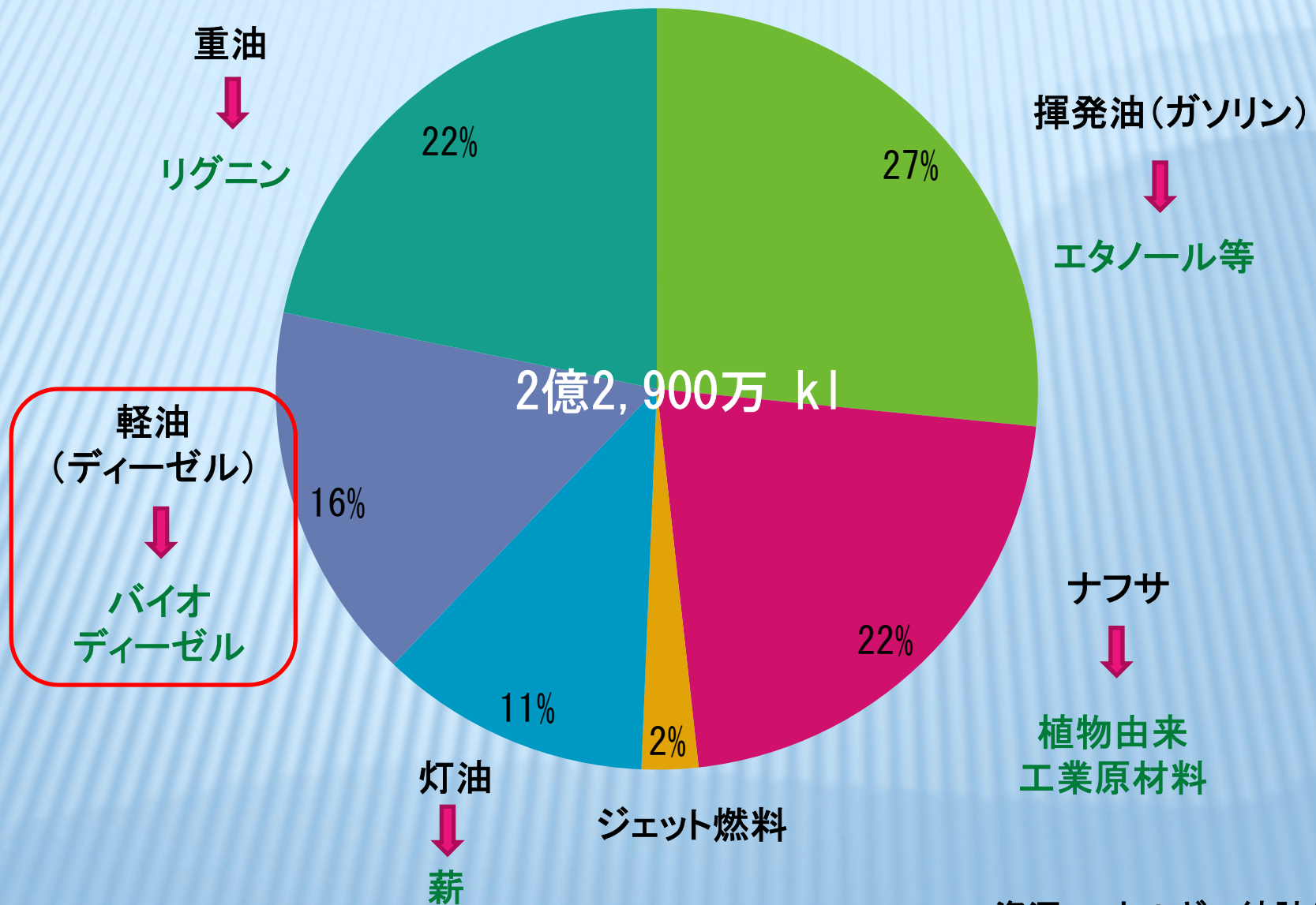


全糖質 2,950万トン → エタノール 1,780万kl

年間ガソリン消費量 6,000万kl の 29.7%

東南アジアへ技術移転すれば稲ワラだけで7,300万kl

わが国の石油の用途(2006)

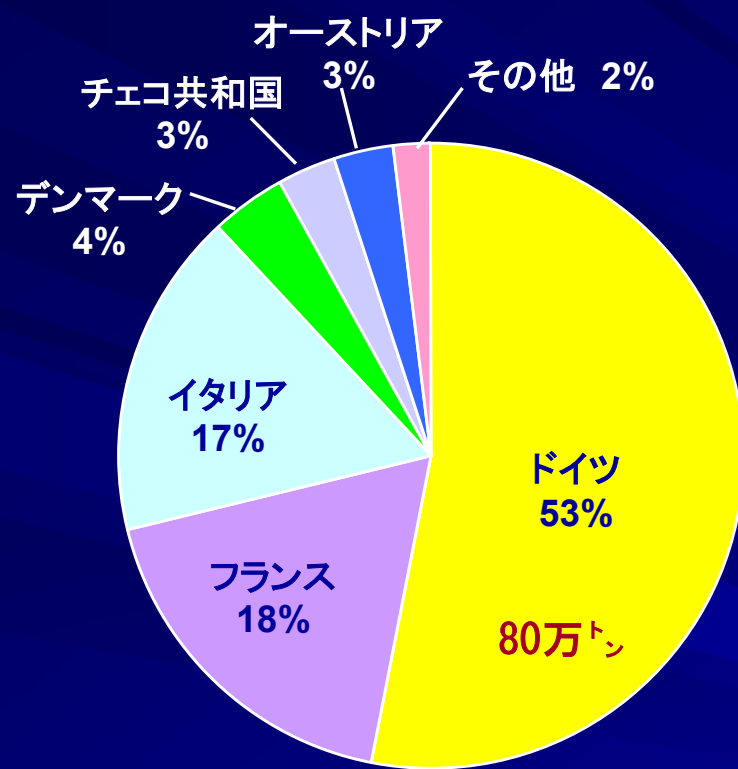


バイオディーゼル燃料生産(メタノリシス反応)



化学触媒法と酵素触媒法との比較

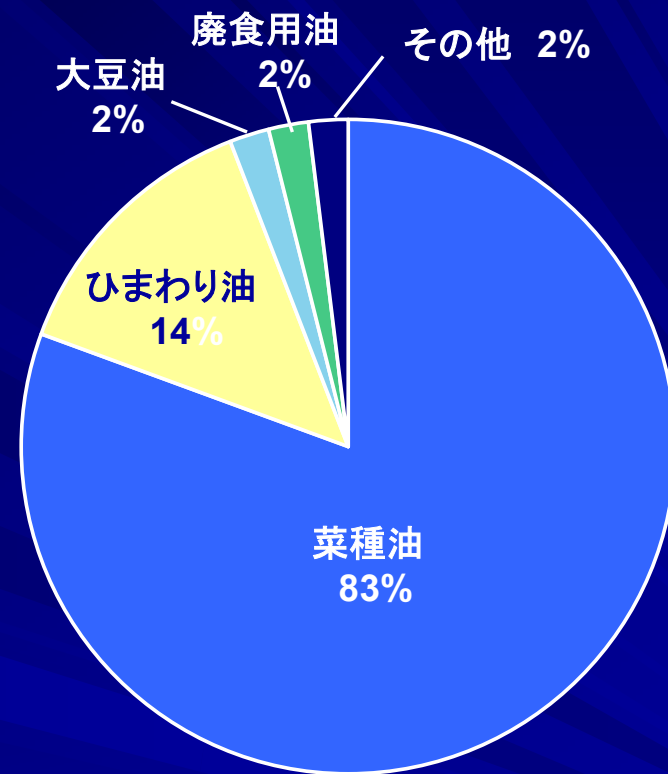
比較項目	化学触媒法 (KOH,NaOH)	酵素触媒法 (リパーゼ)
反応温度	60～65℃	30～35℃
反応メタノール量	量論量の2～3倍	量論量(3モル)
生産物精製	中和処理必要	中和処理不要
副生産物回収	回収困難	回収容易
遊離脂肪酸	石鹼の生成	メチルエステルに合成
触媒コスト	安 価	高 価



EUにおけるBDFの生産量
(2004年)

出所: Biofuel Barometer 2005 (欧州委員会、2005)

米国 10万トン



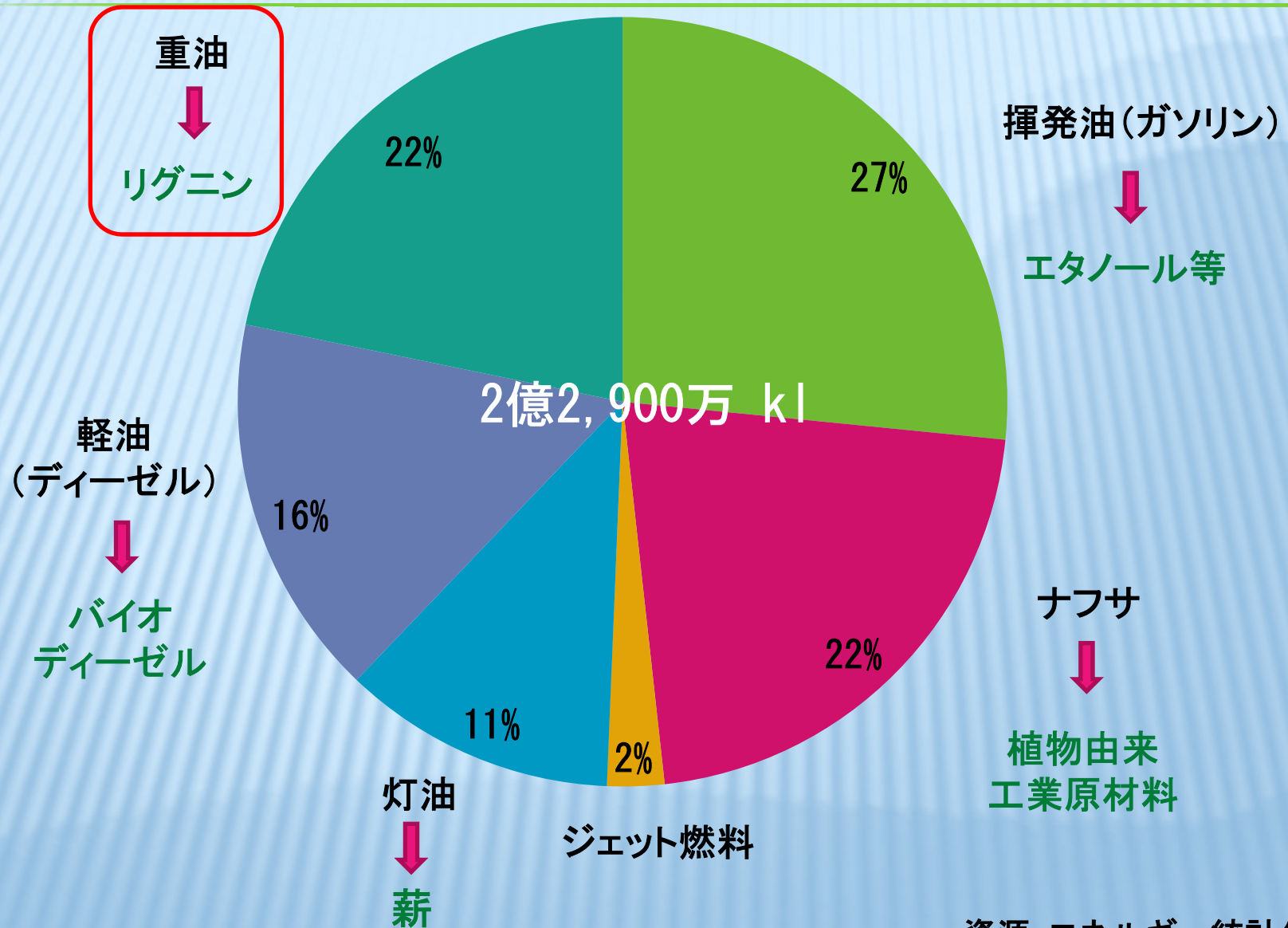
EUにおけるBDF原料比率

出所: 第20回燃料政策小委員会資料

油糧バイオマスの年間生産量

	世界 (億ト)	油生産量 (万ト)
収量 (油ト/ha)		
大豆	2.14	1,760
0.35		
ナタネ	0.46	1,200
0.64		
アブラヤシ <i>Jatropha curcas</i> L. 4.9 (和名: ナンヨウアブラギリ) ヒマラヤ 原産地: 中央アメリカ 熱帯・亜熱帯の半乾燥地で生育 樹高3~5m、樹齢50年 ヤトロファ 種子の含油量30~40% 1.75 有害アルカロイドを含み非食用油	0.55	2,000
		
	1.9 kl/ha (バイオディーゼルの比重: 0.93)	
	世界の軽油消費量 15億kl	
	必要栽培面積 8億ha	世界の半乾燥地 34億ha

わが国の石油の用途(2006)



重油をリグニンでまかなうのは可能か

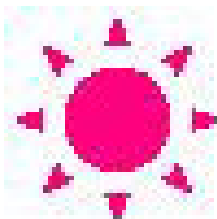
世界の年間重油消費量	21 億 kl
	19 億 ^{トン} (比重 0.9)

廃棄物バイオマスの年間発生量	43 億 ^{トン}
リグニン量 (平均含量: 25%)	11 億 ^{トン}

(未利用バイオマスの年間生産量 520億^{トン})

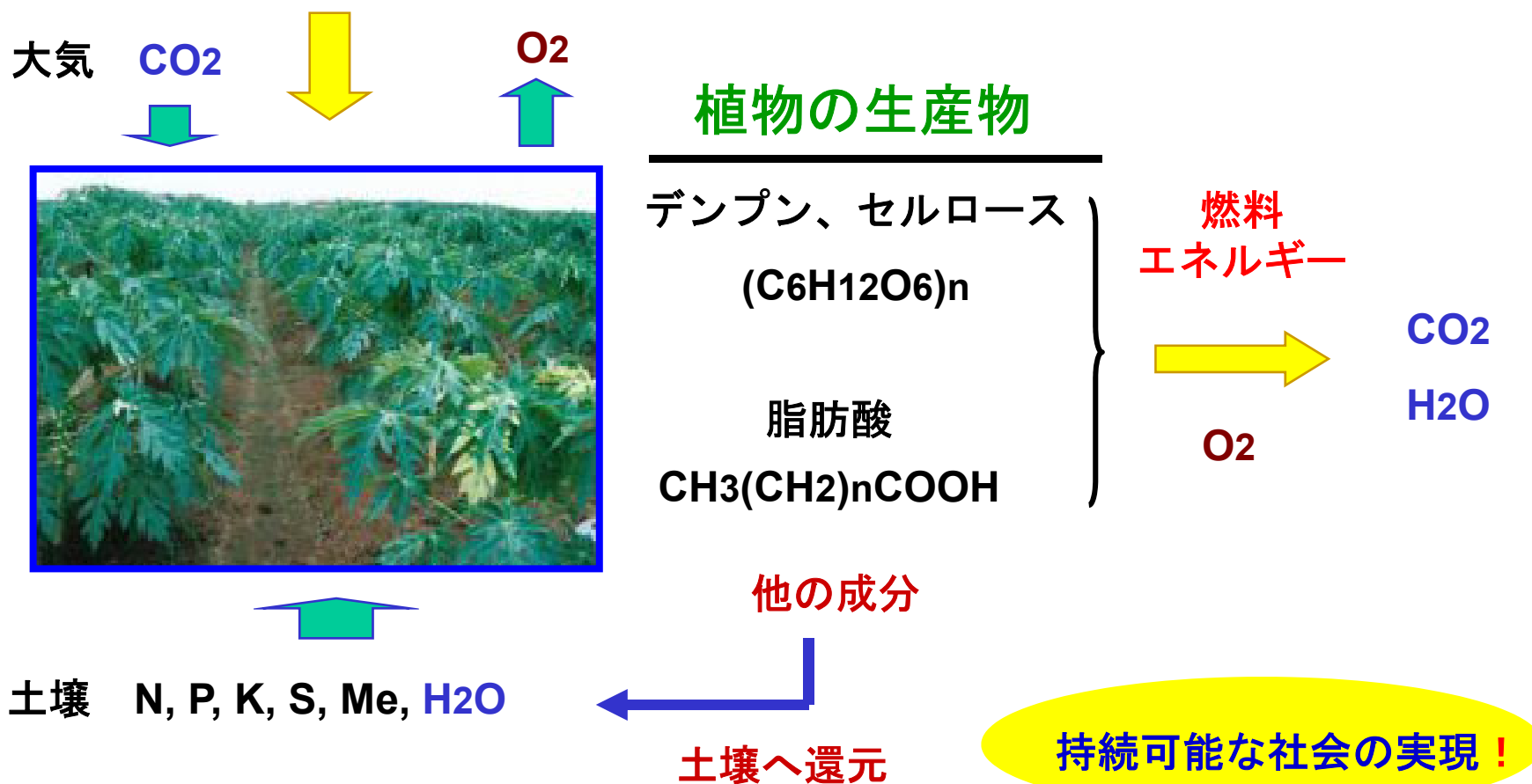
開発が求められるわが国のバイオマス利用

間伐材、果樹廃材、道路・公園・街路樹の剪定材、雑草

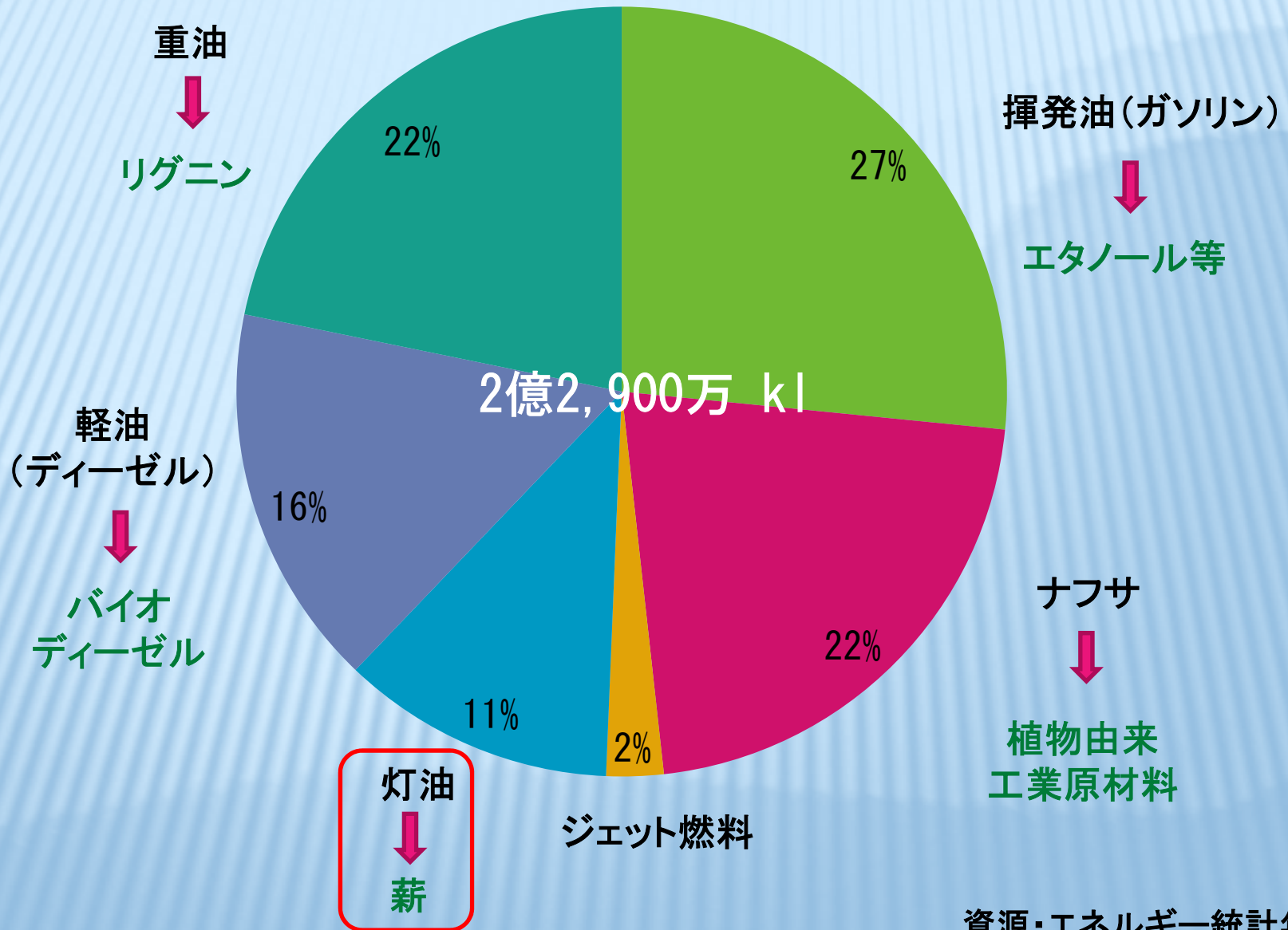


太陽エネルギー

植物バイオマスエネルギーの 利用と物質循環系の確保



わが国の石油の用途(2006)



植物バイオマスの直接燃焼の問題点

原油のイオウ含量

マレーシア 0.05 %

インドネシア 0.1 %

アラスカ 1 %

中東 1~4 %

 SOx
NOx (酸性雨)

脱硫・脱窒装置

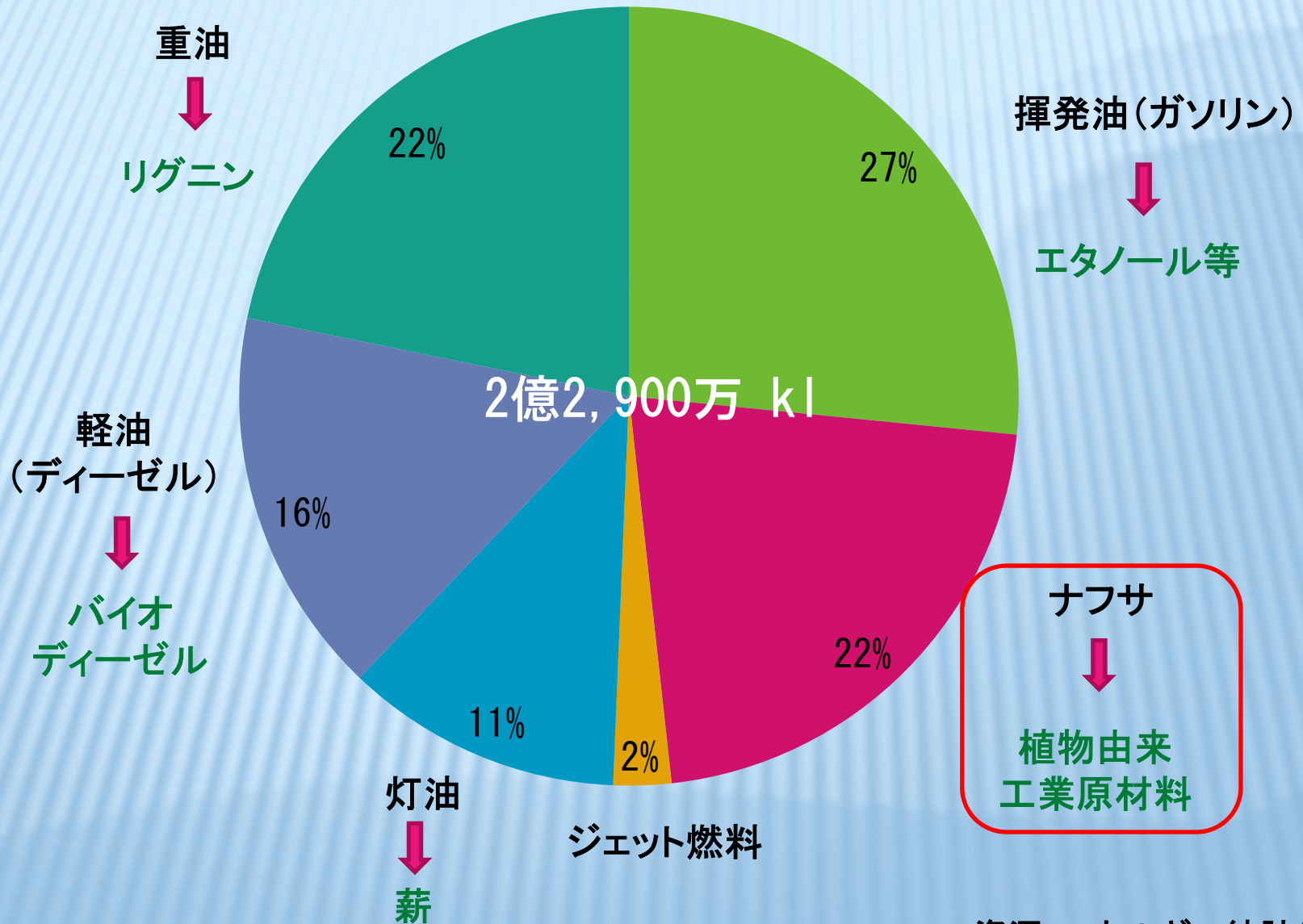
植物のイオウ含量

0.1~

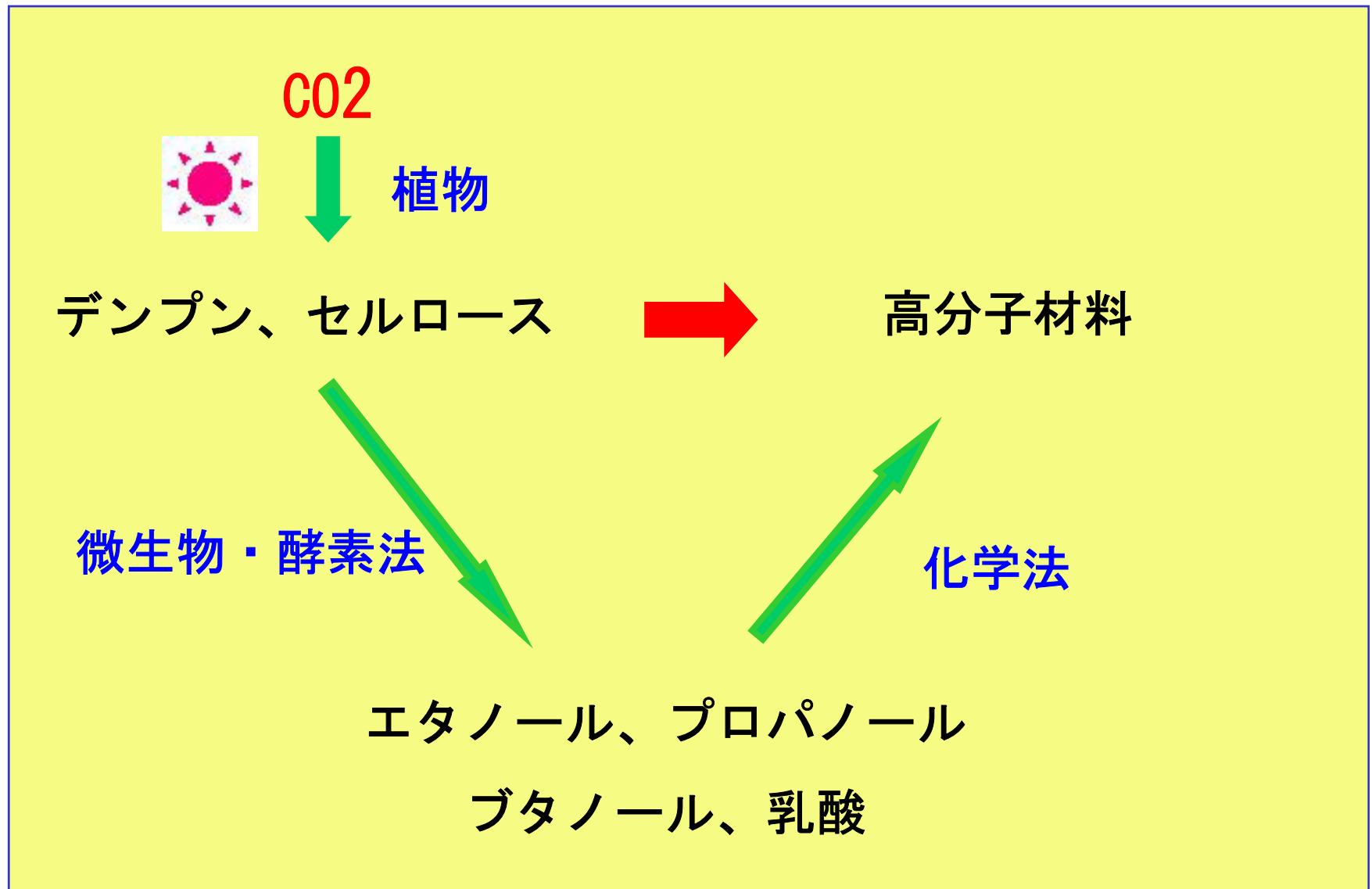
小規模装置？

1.5 %

わが国の石油の用途(2006)



バイオリファイナリーのあり方



植物資源から高分子複合材料の開発

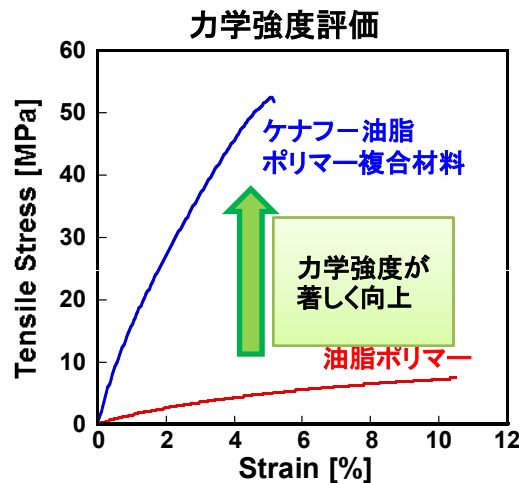
阪大工・宇山 浩

既存の**植物樹脂**（**ポリ乳酸**など）や開発中の**植物樹脂**（**油脂ポリマー**など）は物性が実用レベルに十分に達せず、多様な用途に対応できない。

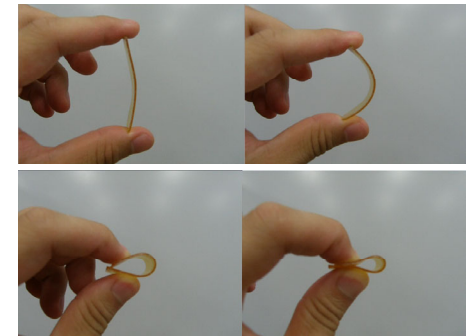
開発例(阪大)
ケナフー油脂ポリマー複合材料

開発例(NEC)
ケナフーポリ乳酸複合材料

開発例(阪大)
ロジンー油脂ポリマー複合材料



耐熱性 & 耐衝撃性が向上



靱性が大幅に向上、既存エポキシには見られない柔軟性を達成

汎用プラスチックに匹敵する物性を付与

ケナフー油脂
ポリマー複合材料



油脂ポリマーの応用例

コーティング材料、形状記憶樹脂、制振材料、エラストマー、透明材料、接着剤、粘着剤、フィルム（シート）

植物由来の工業原料の年間生産量（万トン）

紙パルプ	ユーカリ（紙パルプの50%）	15,000
天然ゴム	パラゴム（シスゴム、ブタジエンゴムと等量）	9,000
	トチュウゴム（トランスゴム）	260
綿	全繊維の40%	1,900
ロジン	印刷インクの接着剤	140
トウモロコシ		69,500
米		63,500
小麦		60,600

2006年実績（総務省統計局「世界の統計2008」）

「植物利用エネルギー合理化工業原料生産技術開発」

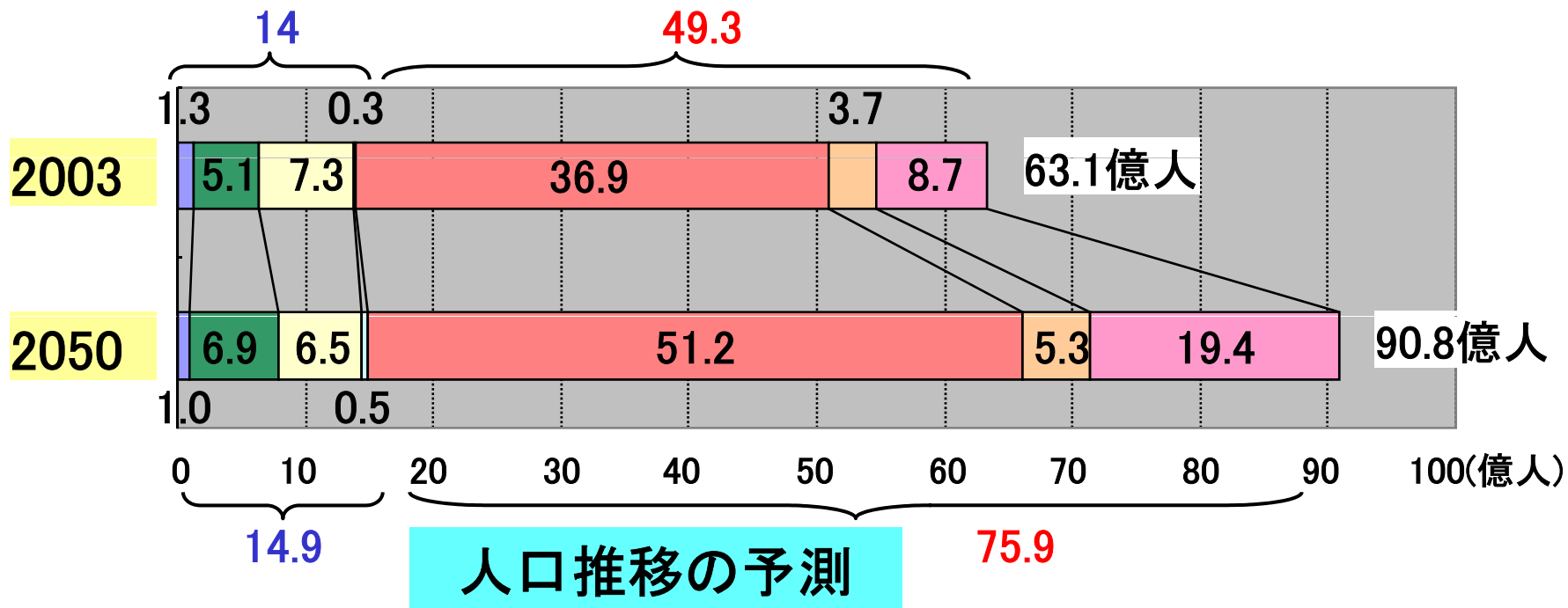
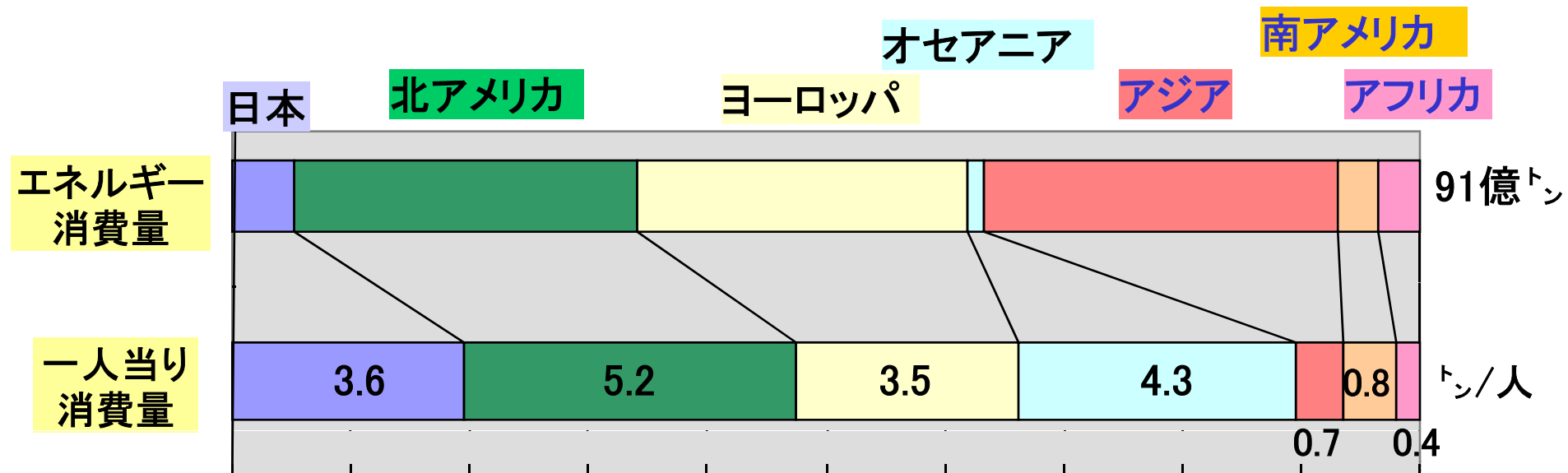
(1999-2005)

王子製紙(酸性土壌で生育するユーカリ)、大成建設(PHBを蓄積する樹木:ハイブリッドファイバー)、日立造船(トチュウゴムの生合成)、東洋紡(低温・乾燥・塩耐性サツマイモを作出)、豊田中研・出光興産(耐病性サツマイモ)、奈良先端大(集中研、30遺伝子連結技術開発、網羅的プロモーターの取得)等

「植物の物質生産プロセス制御基盤技術開発」

(2002-2009)

王子製紙(転写因子によりユーカリの生長を30%促進)・日本製紙(耐塩性ユーカリの野外栽培安全性を実証)、ブリジストン(パラゴムの生合成の全貌をほぼ解明、遺伝子群の取得)、日立造船(トチュウゴムの実用生産を中国で開始)、かずさDNA研(集中研、転写物、代謝物の統合データベース)等



エネルギー需要量（石油換算 億トン）

0 50 100 150 200 250 300 350 400 450 500

2003

91億トン

1 現状維持
(人口増分)

2 日本並み

3 米国並み

1

112億トン(1.24倍)

2050

2

318億トン(3.5倍)

3

472億トン(5.2倍)

日本

ヨーロッパ

アジア

南アメリカ

アフリカ

北アメリカ

オセアニア

2050年のエネルギー需要シナリオ

2050年の現実的なシナリオ

食料、飼料、パルプ、繊維など有用バイオマス

7 TW → 10~12 TW (1.4~1.7倍)

エネルギー

12 TW → 24~30 TW (2.0 ~2.5倍)

合計

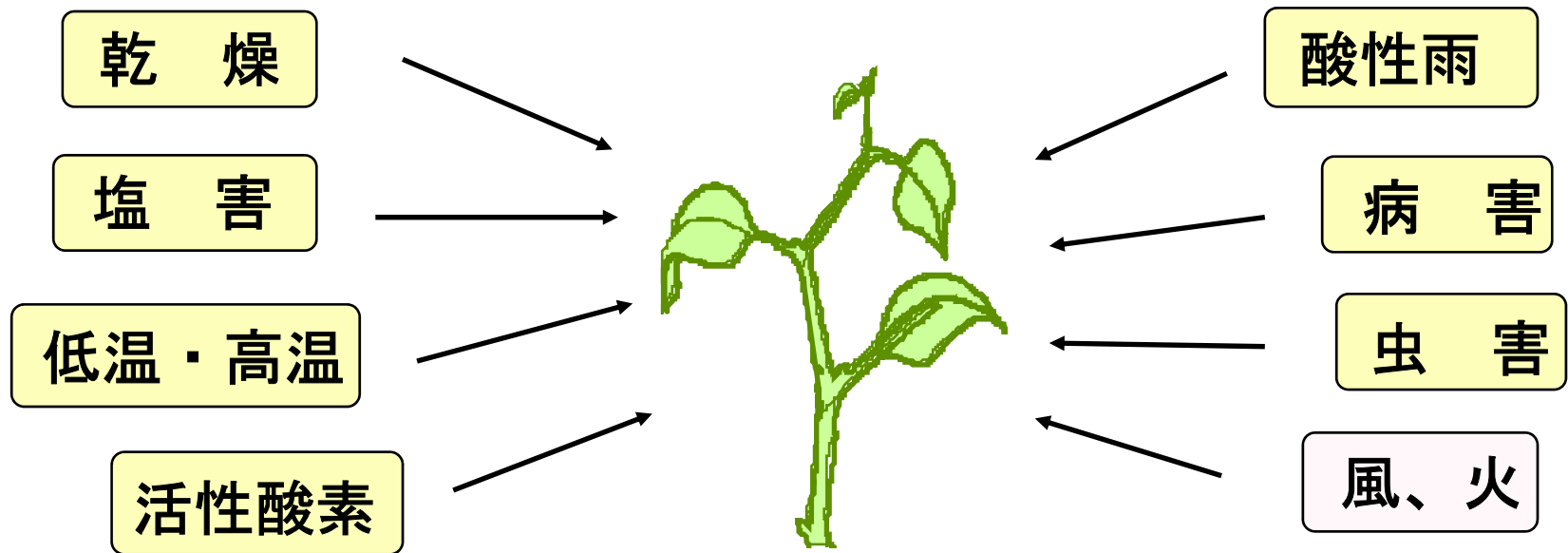
34~42 TW

エネルギー 10 TWは未利用バイオマスから
10 TWは他の再生エネルギー（太陽光、風力
等）から

不足分、14 ~ 22 TW分の植物を遺伝子組換え技術で増産

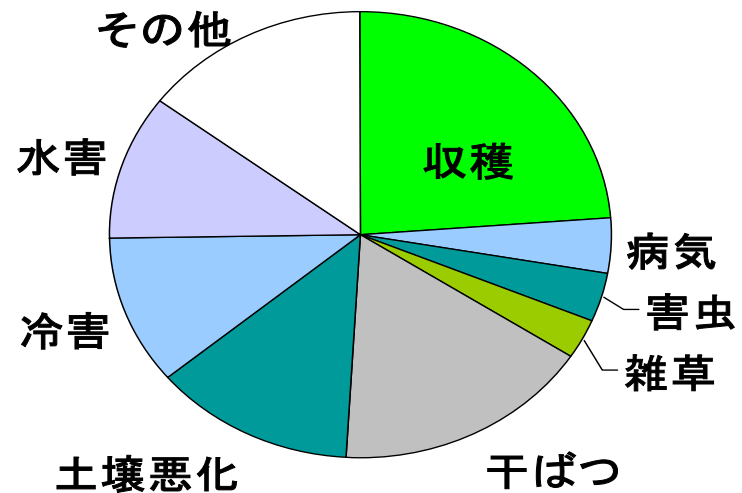
遺伝子組換え可能な栽培植物を2~3倍増産

植物の受ける環境ストレス



ストレスによる植物の
生産力の減少
(米国の農業)

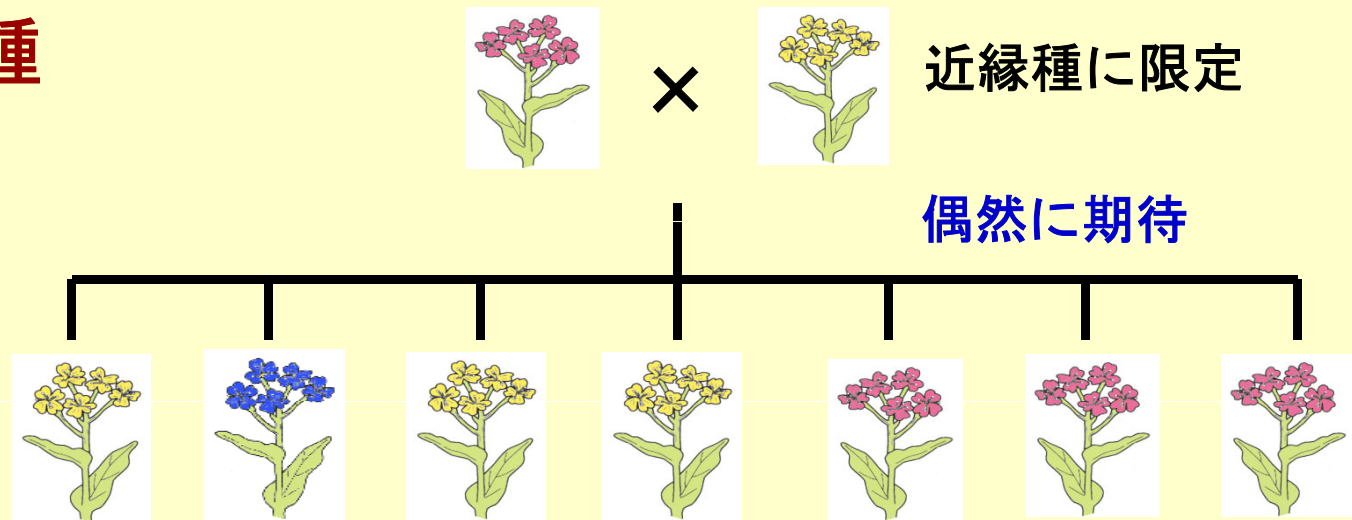
出典(Science 1982)



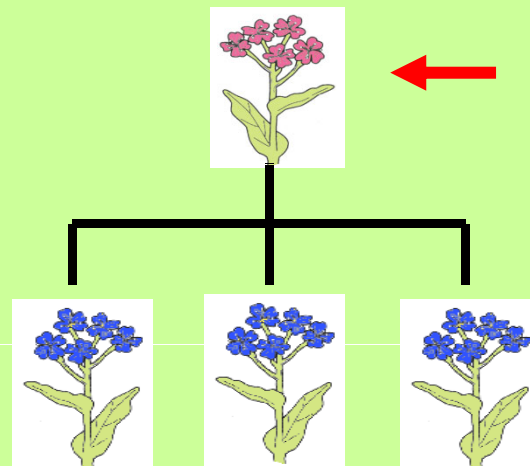
突然変異が困難な植物の育種

人類の救世主！ 遺伝子組換え技術

交配育種



遺伝子組換え 技術



他生物の遺伝子

起源を問わない

目的に応じた遺伝子を利用

複数遺伝子の導入が可能

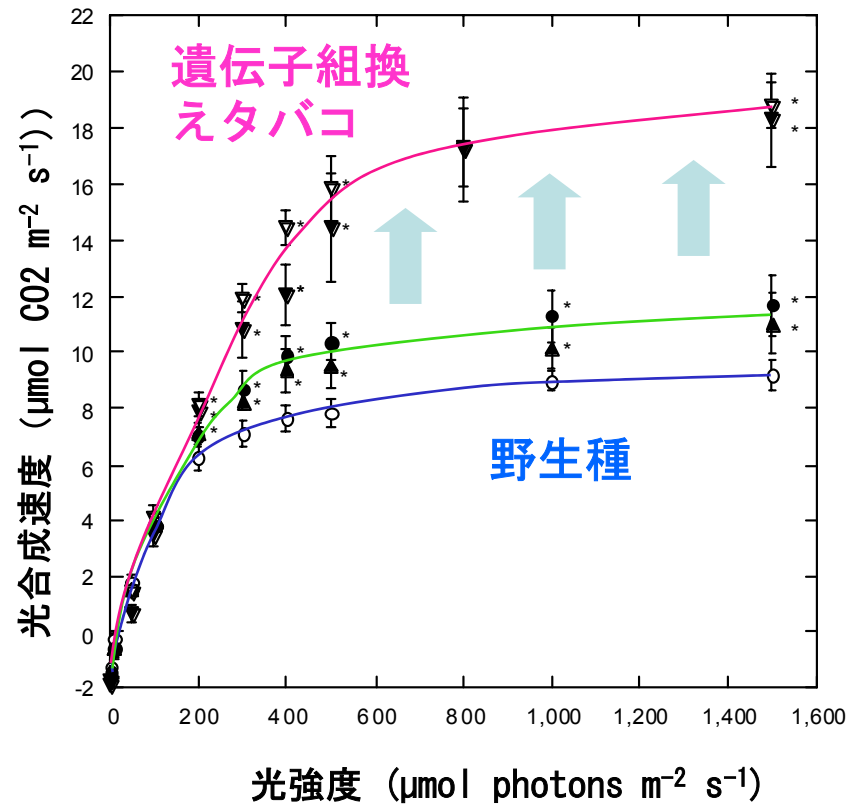
短期間で達成

葉緑体への遺伝子導入による光合成能の拡大

奈良先端大、横田ら（特願 2004-59513）

FBP/SBPase遺伝子導入

RuBisCO
活性化

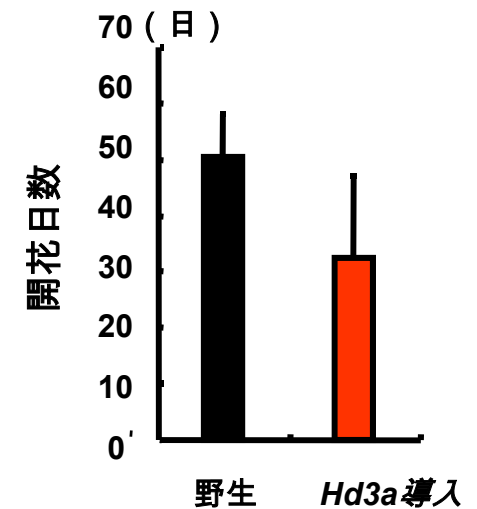
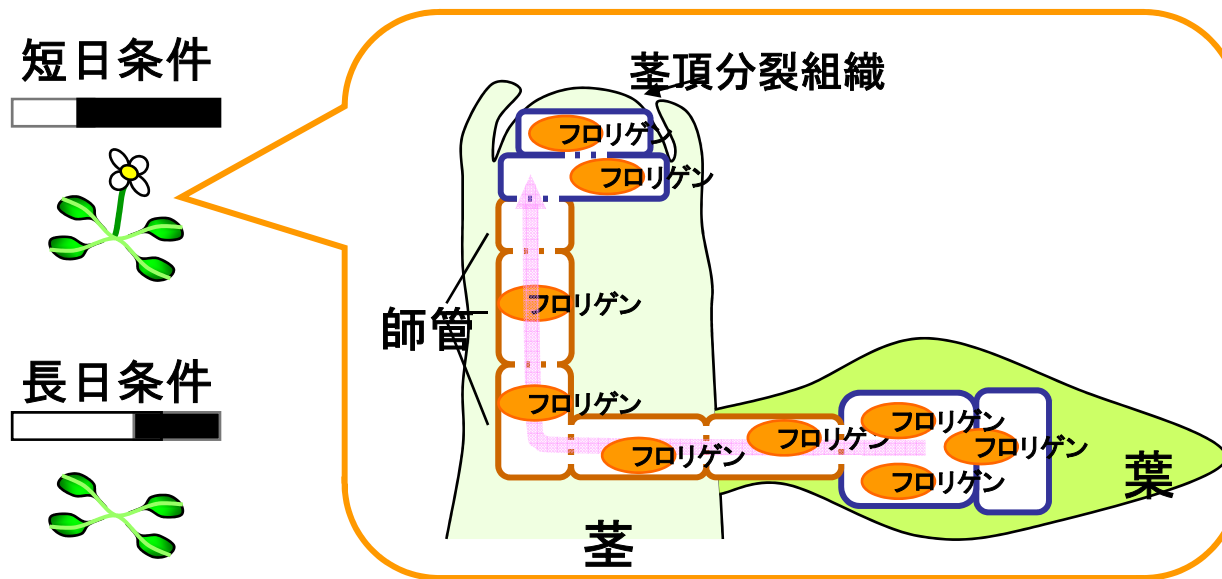


野生タバコ

遺伝子組換えタバコ

花成ホルモン：フロリゲンを合成する遺伝子、*Hd3a* の発見

奈良先端大 玉置、島本ら (2007)



イネの短日条件下における出穂（開花）日

イネなどの収穫期を60%短縮
→ 日本で年3回栽培 →
麦、トウモロコシ、大豆などへ波及

ボツワナ砂漠の野生スイカの根を伸ばす遺伝子



灌水 乾燥

野生スイカ

根の生長を促進する遺伝子



野生型



遺伝子導入体

シロイヌナズナ

奈良先端大 明石、横田ら (2007)

バイオマス増産の戦略

- ・ 栽培面積の拡大

乾燥地、塩土、高温/低温地域・期間、酸性/アルカリ土壌
の活用

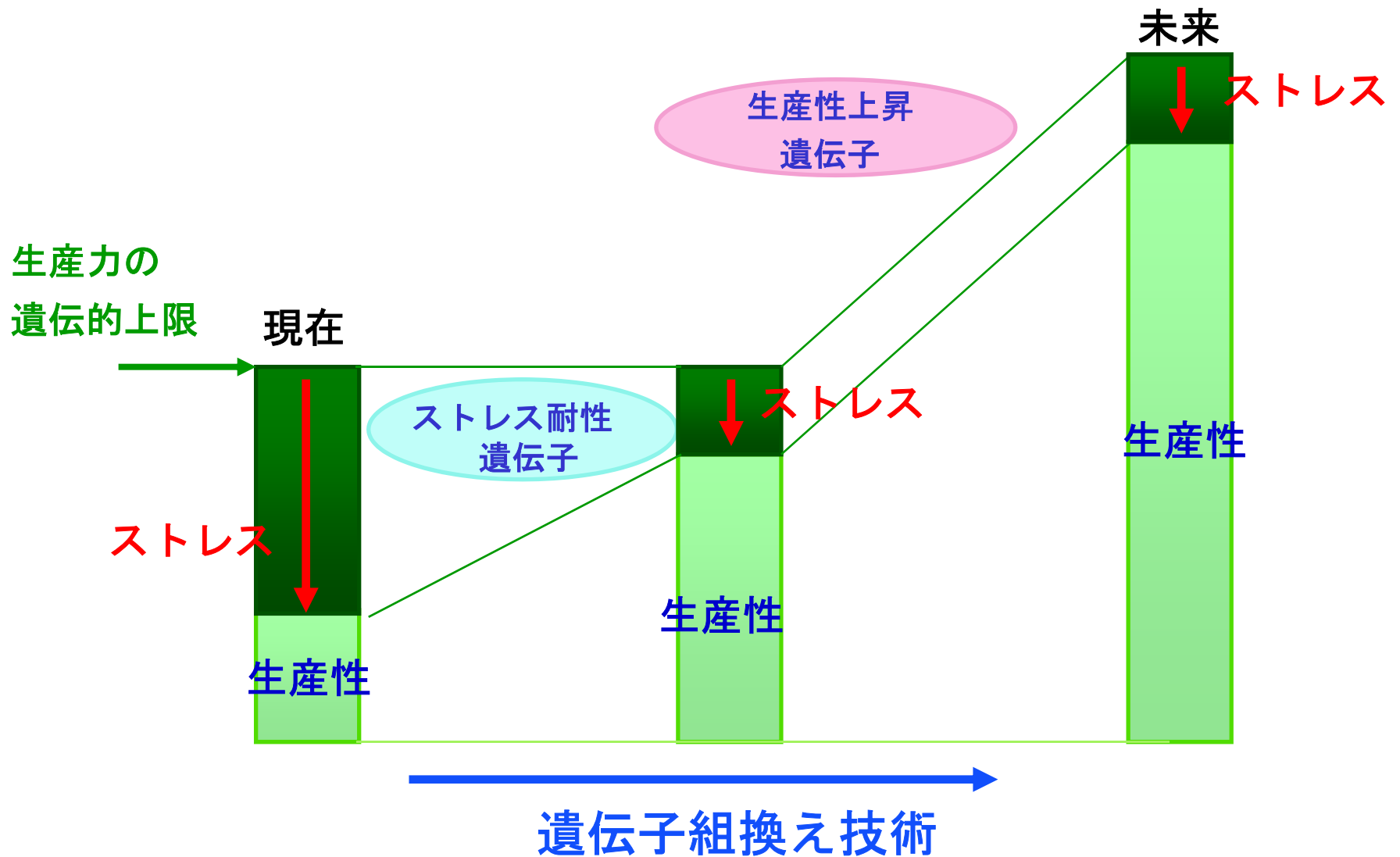
- ・ 単位面積当りの生産性向上

光合成効率、炭酸固定、成長速度、種子/塊根の増大、
収穫時期の短縮

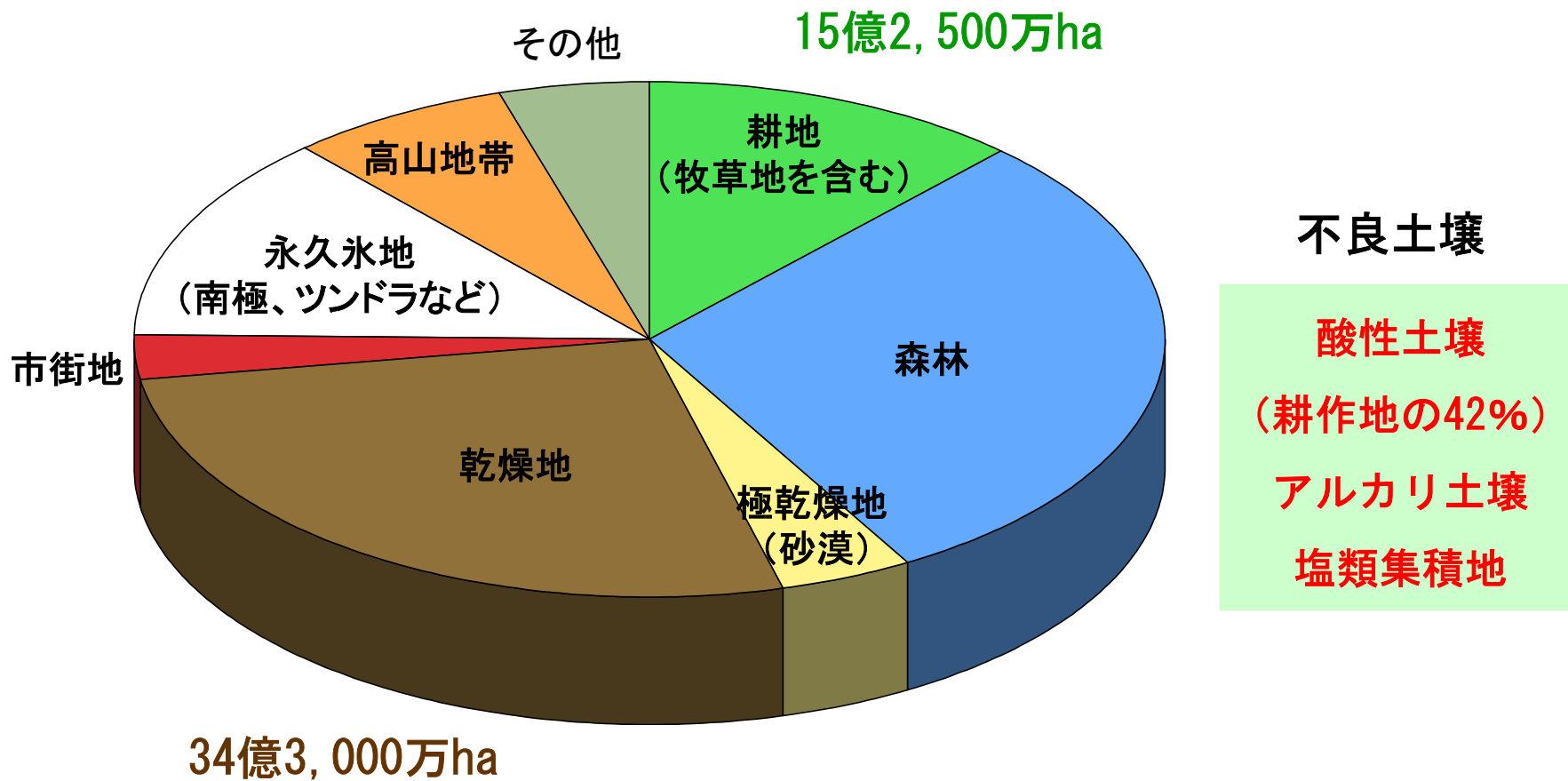
- ・ 植物の育種

遺伝子組換えによるストレス耐性付与および生産性向上

遺伝子組換え技術による植物の生産性の向上



地球上の全陸地面積 128億ヘクタール (水域を除く)



遺伝子組換え植物の生態系への影響は深刻か？

～ 遺伝子の水平移動 ～

- | | | |
|-------------|---------|-----------|
| ・ 花粉を介する移動 | 近縁種に限定 | 隔離距離、開花時期 |
| ・ 微生物を介する移動 | 全生物種に移動 | 極めて低い頻度 |
| ・ 遺伝子の種類 | 危険度が異なる | 植物にとって優劣 |

植物の有害物質



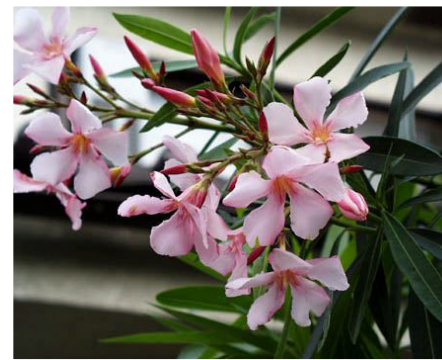
ジャガイモ
彼岸花

ソラニン
！！！！、



トリカブト

アコニチン



夾竹桃

オレアンドリン



世界の水資源

河川水の現存量：1兆3千万トン

10—15日に1回循環、年間総量：37兆トン

使用できる量は20%弱：7兆トン

2000年の水需要：6兆トン

2050年の水需要：30兆トン

(人口が2倍になると6倍の水が必要)

四万十川

(f-koike' Home Page)

限りある鉱物資源

資 源	埋蔵量	可採年数（年）
鉛	12,500 万ton	22
スズ	428 万ton	23
銀	43,545 万ton	30
金	4,821 万ton	31
亜鉛	29,500 万ton	

動物科学

応用

ヒト

基礎

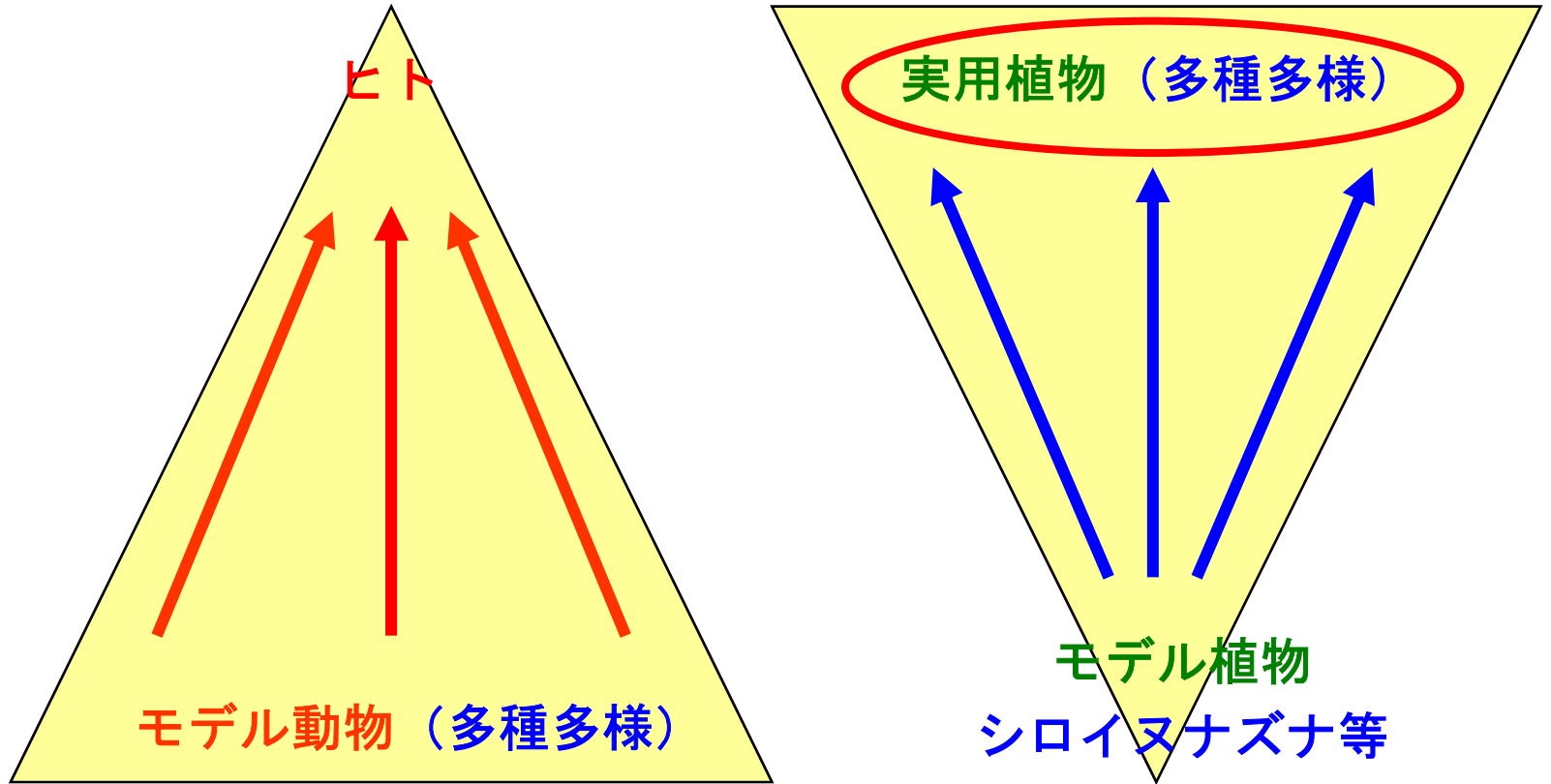
モデル動物（多種多様）

植物科学

実用植物（多種多様）

モデル植物
シロイヌナズナ等

生命科学の基礎研究と応用研究



サイエンスからテクノロジーへの進化

多くの重要な遺伝子（**ストレス耐性**、**成長促進**、**一次・二次代謝遺伝子**、**転写因子**、**制御因子**）がモデル植物から分離され、機能が明らかになりつつある

（植物バイオサイエンス）

統合データベース（モデル植物、実用作物）の整備
（ゲノム、転写物、タンパク質、代謝物質、**代謝制御**）



実用植物への応用

多重遺伝子の導入

遺伝子発現の定量的制御

遺伝子組換え植物の実用栽培

（植物バイオテクノロジー）

20 C

石油の世紀



Black Gold

飽食、快適、便利な生活

地球温暖化、環境破壊

有害化合物と重金属汚染

過去の太陽エネルギーの産物

確認埋蔵量 (2002) 1兆444億バレル

可採年数 40.6年

21 C

バイオマスの世紀



Green Gold

カーボンニュートラル

持続可能な社会の構築

現在の太陽エネルギーの産物

バイオマスエネルギーの生産量は

消費量の8倍

大幅増産が可能

21世紀の国策 : 植物バイオマスの増産とバイオテクノロジーの振興



宵月薬師寺伽藍（西暦730年建立）

写真：入江泰吉