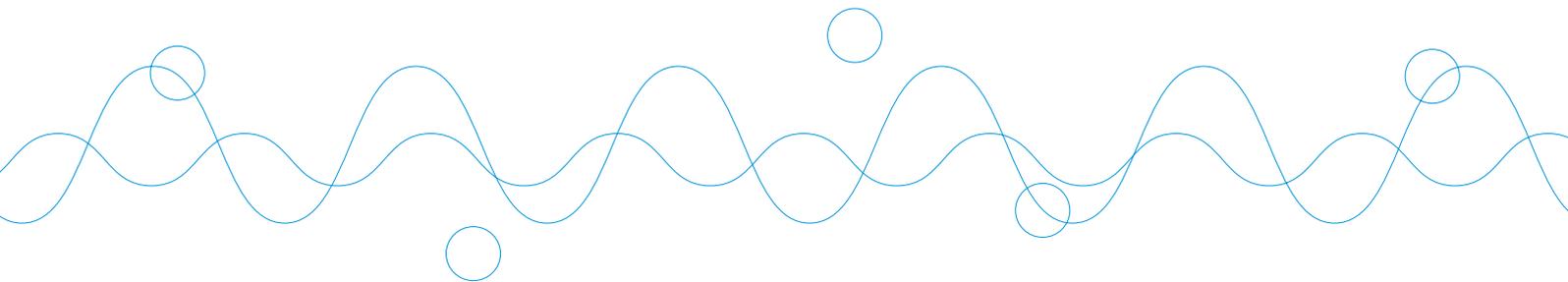


ATTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC
TGA CCTAACT CTCAGACC

G-TeC レポート

第三世代バイオマス技術の 日米欧研究開発比較

0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
00110 11111100 00010101 011



要 旨

バイオマスの利用技術について日米欧の比較調査を行った。バイオマスは温室効果ガス対策の柱である再生可能エネルギーの中でも、貯存量、利便性、安定性の点から最も有望視されている。日本でもオイルショックの直後に多様な利用技術開発が開始されたが、その後価格・供給が安定化した石油に比べ経済性が悪く、普及していない。最大の要因はそれらの技術(ここでは第二世代技術と称する)で効率良く利用でき、付加価値が高い液体燃料に変換可能な成分はバイオマスのごく一部であり、大部分は効率の低い直接燃焼による利用にならざるを得なかった点にある。

これに対し、欧米では継続的にバイオマス利用技術の研究を進めてきており、バイオマスのほぼ全量を高付加価値の液体燃料や化学物質に変換できる第三世代技術が開発されつつある。今回の調査では、この第三世代技術に関し米国、欧州に調査団を派遣し、国内外の文献調査結果とあわせて日米欧の比較を行った。

米国、欧州ともにバイオマス利用の主眼は運輸用液体燃料の石油依存からの脱却であり、それぞれ数値目標を置いて導入を図っている。米国はすでにトウモロコシのでん粉からのエタノール製造を産業化している。次の段階としてトウモロコシの芯・茎・葉等のソフトバイオマスからエタノールを製造する技術を開発しつつあり、世界のトップレベルにある。更に量的に最も多い木質等のハードバイオマスからエタノールを製造する技術の開発にも着手している。またエタノールと並行して、バイオマス起源の付加価値の高い化学物質を併産するバイオマスリファイナリを建設する計画を持っており、その中核としてシュガープラットフォームという新しいコンセプトに基づき技術開発を進めている。欧州はこれまで植物性および動物性油脂から製造するバイオディーゼル燃料の技術開発と利用促進を進めてきており、次の段階として、米国と同様、木質バイオマスのエタノール他の化学物質への変換技術の研究開発を進めている。わが国でも NEDO、公的研究機関、大学、食品関連企業を中心に変換技術の研究開発を進めつつあるが、木質バイオマスの変換技術に関しては欧米に比べやや遅れている。バイオマスリファイナリについては米国で NREL とデュポン、カーギル・ダウ等の大企業が協力して建設計画を具体化しているのに対し、欧州およびわが国は戦略的な取組みが十分とはいえない。

木質バイオマスの変換に関しては、セルロース、ヘミセルロースなどを難分解なりグニンから分離し、発酵や化学物質合成の原料となる単糖に分解(糖化)する技術が最も重要である。環境負荷が低い酵素法で糖化する場合には、セルロースやヘミセルロースが糖化酵素と反応できる状態にする前処理技術の高度化と糖化酵素の開発が必要である。米国NRELは前処理技術の高度化のためバイオマスの細胞壁構造を解明するためのラボを新設して研究を進めている。糖化酵素の開発は、米・欧いずれも、遺伝子組換えを中核とした技術の開発を推進している。そのための微生物育種に関しては欧州と米国が進んでおり、わが国はやや遅れている。

糖に分解した後の発酵技術に関しては、わが国は酵母を中心として優れた技術を持っており、日米欧ほぼ同レベルである。また微生物の育種・利用技術に関してもわが国の大学・公的研究機関はいくつかの先進的な取組を進めており、木質バイオマスの生化学的変換技術において欧米と同等以上の技術を開発できるポテンシャルは十分にある。

わが国はこれらの技術をベースに、アジア地域で多量に産出する木質をはじめとするハードバイオマスを有効に利用する技術を開発し、国際的に優位なバイオマス産業を育成することが重要である。

以上の検討結果に基づき、国が重点的に推進すべき課題として以下を提案する。

ハードバイオマス前処理・分解糖化技術

- ・ わが国およびアジア諸国のハードバイオマスの細胞壁詳細構造解明
- ・ 前処理技術
- ・ 無酸リグニン分離・糖化技術
- ・ リグニン分解微生物の育種
- ・ セルラーゼ、ヘミセルラーゼ生産微生物の育種
- ・ 高活性糖化プロセス

燃料・材料併産技術(バイオマスリファイナリ技術)

- ・ バイオマスから合成しうる有用物質および変換プロセスの探索
- ・ 生化学変換プロセス
- ・ 生化学変換に用いる微生物の育種
- ・ 熱化学分解・ガス化プロセス
- ・ タール除去技術
- ・ 液体燃料・有用物質合成触媒
- ・ 生成物分離技術(膜技術等)
- ・ 最適トータルシステム

目 次

第 部 国際比較

1.	目的	1
1.1.	背景	1
1.2.	目的	2
2.	調査の内容	3
3.	調査の方法	5
4.	調査結果および国際比較	7
4.1.	開発戦略	7
4.2.	研究開発	8
5.	まとめ	15
6.	詳細技術比較表	17
7.	謝辞	17

第 部 サイトレポート

1.	米国	26
1.1.	University of Purdue	26
1.2.	Gas Technology Institute	30
1.3.	National Renewable Energy Laboratory (NREL)	33
1.4.	Community Power Corporation (CPC)	47
1.5.	Novozymes International	51
1.6.	Hawaii Natural Energy Institute (HNEI)	55
2.	欧州	59
2.1.	VTT (Technical Research Center of Finland) (生化学)	60
2.2.	VTT (Technical Research Centre of Finland)(ガス化)	62
2.3.	Institute for Agrobiotechnology (IFA-TULLN), Department of Environmental Biotechnology	68
2.4.	BioDiesel International (BDI)	72
2.5.	Renewable Resources, Institute of Chemistry, University of Graz	75
2.6.	Vienna University of Technology (TUWien)	77
2.7.	Institute of Structural Biology and Microbiology, CNRS (IBSM-CNRS)	80

1. 目的

1.1 背景

持続可能な社会の構築は、現代の科学技術における最重要課題である。特に、エネルギー起源の二酸化炭素を中心とした温室効果ガスの排出量低減は焦眉の課題である。その対策として様々な再生可能エネルギーが提案され、研究開発が進められているが、中でもバイオマスは唯一の再生可能な物質資源でもあり、貯存量、利便性、安定性の面から最も有望と考えられる。¹⁾²⁾

石炭、石油等の化石資源が、太古に生物によって固定された炭化水素であるのに対し、バイオマスは現時点で固定されつつある炭化水素であり、常に再生産されている。化石資源で出来ることはバイオマスでも可能であり、将来的には化石資源の相当部分がバイオマスに置き換わると予想される。

バイオマスのエネルギーは、古くから薪、炭、ロウ、油として使われてきた。近代の石炭、石油の大量使用以前はバイオマスが唯一ともいえるエネルギー源であった。しかし、安価で使いやすい化石資源の登場によってエネルギー源としてのバイオマスの利用は大幅に減少した。1970年代の石油危機の直後はバイオマス発電、エタノール発酵、嫌気性メタン発酵などの第二世代のバイオマス利用技術の開発が活性化したが、原油価格の安定化に伴い、コスト高で保守の手間のかかるバイオマスの利用技術開発は再び低調となった。しかし、1990年代以降の温室効果ガスへの懸念の高まりと原油需給の逼迫によって再度注目されつつある。この間欧米では、起伏はあったが、継続的な研究開発が進められ、最新のバイオテクノロジーや熱化学に基づく第三世代技術が開発されつつある。将来、バイオマスは化石燃料に換わり、エネルギー源や、工業材料の中核になると予想される。バイオマスの第三世代技術に関し、優位に立つことは将来のエネルギーセキュリティ、産業競争力の観点から必須の課題である。

1.2 目的

本 G-TeC の目的は欧米のバイオマス利用戦略および第三世代利用技術に関する研究開発状況を調査し、日本の現状、ポテンシャルと比較することによって、わが国のバイオマス研究開発の指針を示すことにある。

バイオマスの利用は既に第二世代技術によって実用化されているが、自立した産業として普及してはならず、補助金等によってごく一部で使われているだけである。温室効果ガス削減に効果が期待できる

1) 科学技術の未来を展望する戦略ワークショップ - バイオマスエネルギー利用システムの普及・高度化に向けた研究開発課題 - , JST 研究開発戦略センターワークショップ報告書 (CRDS-FY2005-WR-01), 平成 17 年

2) 戦略プロポーザル 未来型バイオマスエネルギーシステム基盤技術 (CRDS-FY2005-SP-01)

ほど大量に使われるためには産業として自立することが必要であり、効率(エネルギー収率)、経済性に優れ大規模な普及が期待できる第三世代の技術開発が必要である。本 G-TeC ではそうした第三世代技術に注目して調査を行った。

2. 調査の内容

図 2.1 にバイオマス利用形態の概要を示す。最終利用形態としては、石油と同じように、熱、電気、ガス、液体燃料、有機化学材料、薬品等がある。多様な種類のバイオマスをこれらの形態に変換する技術は時代とともに進歩してきている。表 2.1 にそうしたバイオマス利用技術の世代分けを示す。バイオマスが唯一のエネルギー源であった時代の第一世代技術は効率、利便性ともに悪く、このため安価で使いやすい化石燃料に取って代わられた。石油ショック以降に取り組み始めた第二世代技術では、利便性を上げるため糖やでん粉のエタノール発酵、嫌気性発酵によるガス化、直接燃焼あるいはガス利用による発電が試みられたが、化石燃料の利用技術と比較して効率ははるかに低かった。バイオマスの収集には手間と費用がかかり、設備費も高いことからコストが割高となり、第二世代技術によるバイオマス利用は大きな産業となっていない。普及のためには化石燃料利用技術と同等以上の効率を達成できる第三世代技術が必要である。

第二世代技術でエタノールやメタンなど利用効率の高いエネルギーに変換できるのは糖やでん粉など分子量の低い成分で、バイオマス全体のもつエネルギーの一部しか使えなかった。一方、原理的に全エネルギーが使える直接燃焼は、水分の含有や材料腐食等の問題から燃焼温度が上げられず、高い効率を得ることができなかった。

これに対し、第三世代技術ではすべての資源を最大限活用することを目指し、資源作物の育種をはじめ、生化学技術

を中心とした低エネルギー消費・低環境負荷の変換技術により、糖・でん粉・油脂以外の成分をも有効に使うことを目指している。特に量の多い木質系バイオマスの主成分であるリグノセルロースや、糖・でん粉作物の葉や茎に含まれるセルロースなどを有効利用することで、エネルギーの収率を上げることが眼目である。また、石油化学と同じように、工業原料としての利用をあわせた統合的な利用が可能になるのも第三世代技術の特徴である。今回の調査では、こうした第三世代技術のうち変換技術を中心に調査、国際比較を行った。

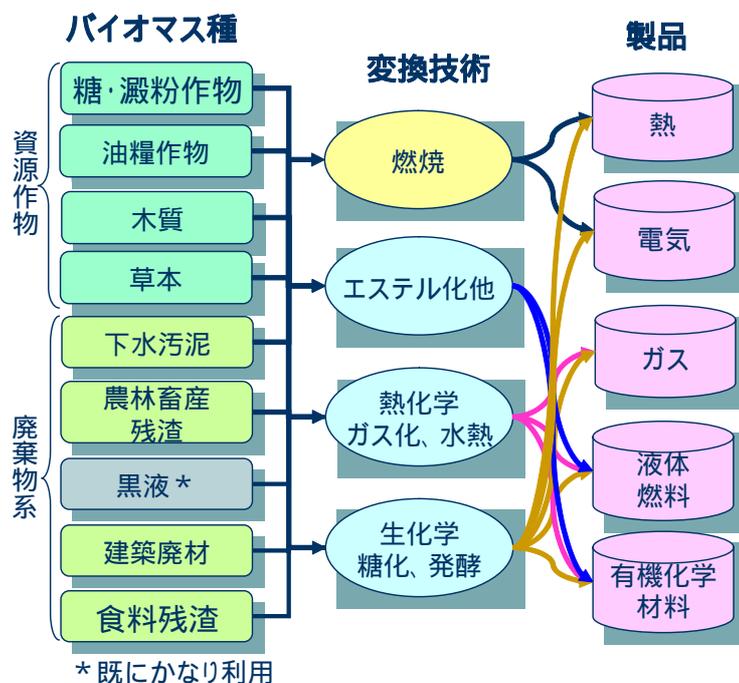


図 2.1 バイオマス利用形態

表 2.1 バイオマス技術の世代

世代	技術	性能
第一世代 < 唯一の資源 >	薪、炭、ロウ、油の光熱利用、構造材料としての利用	
第二世代 < 石油の補完 >	直接燃焼発電、嫌気性発酵、エタノール発酵(糖、でん粉)	発電効率 ~ 10%
	ガス化発電	(資源の部分的利用)
第三世代 < 基幹資源、環境性の追求、QOL の維持 >	技術の統合、複合システム化(バイオマスリファイナリ)、資源作物の育種、生化学的分解・糖化、糖の複合発酵、熱化学変換(ガス化、水熱反応)、糖・リグニンの化学、生分解性プラスチック、化学材料としての利用	化石資源利用技術と同等 (資源の全要素利用)

3. 調査の方法

調査は基本的に当センターの G-TeC 調査の標準的な方法に準じた。すなわち、調査目的にそってメンバーを選定してパネルを組織し、パネル会議で基礎的な調査項目、対象機関を選定し、文献等による調査に加え、現地訪問により確認し、国内の状況とあわせて国際比較を行った。下記にパネルメンバーを示す。対象機関の選定に当っては、変換技術の二つの流れである生化学的変換技術と、熱化学的変換技術の両方をカバーするよう配慮した。また欧州に関しては、バイオマス利用の主流であるバイオディーゼル燃料(BDF)に関連した機関も含めた。表 3.1 に訪問先一覧を示す。

パネルメンバー(順不同)

横山 伸也 (東京大学大学院農学生命科学研究科 教授)(パネル議長)

服部 順昭 (東京農工大学大学院共生科学技術研究部 教授)

山地 憲治 (東京大学大学院工学研究科 教授)

松村 幸彦 (広島大学大学院工学研究科 助教授)

藤江 幸一 (豊橋技術科学大学工学部 教授)

柳下 立夫 ((独)産業技術総合研究所 バイオマス研究センター 主任研究員)

白井 義人 (九州工業大学生命体工学研究科 教授)

斉木 隆 (社団法人アルコール協会 研究開発部長)

坂 志朗 (京都大学大学院エネルギー科学研究科 教授)

森川 康 (長岡技術科学大学大学院工学研究科 教授)

近藤 昭彦 (神戸大学大学院自然科学研究科 教授)

渡辺 隆司 (京都大学生存圏研究所 教授)

花岡 寿明 ((独)産業技術総合研究所 バイオマス研究センター 研究員)

塚原 健一郎 ((独)産業技術総合研究所 バイオマス研究センター 研究員)

粟冠 和郎 (三重大学大学院生物資源学研究科 教授)

天野 良彦 (信州大学大学院工学研究科 教授)

北川 尚美 (東北大学大学院工学研究科 助教授)

鈴木 隆幸 ((独)科学技術振興機構 科学技術連携施策群支援業務室

主監補佐(バイオマス利活用担当))

表 3.1 訪問先一覧

地域	機関	研究分野
米国	National Renewable Energy Laboratory (NREL)	生化学変換、熱化学変換、発電、利用システム
	Novozymes Biotech	糖化触媒 (Cellelase)
	Community Power Corporation (CPC)	発電(バイオマス + SOFC)
	G TI	発電(ガス化)
	Laboratory of Renewable Resources Engineering, Purdue University	酵母の育種、前処理
	U. Hawaii	バイオカーボン
欧州	VTT (ValmistusTekniikka TurvallisuusTekniikka) (Finland)	生化学変換、熱化学変換、発電、利用システム
	Institute for Agrobiotechnology (IFA-TULLN) Department of Environmental Biotechnology (Austria)	エタノール発酵
	BioDiesel International(BDI) BDI Anlagenbau GmbH (Austria)	B D F 製造設備
	Institute for Chemistry, University of Graz (Austria)	B D F 製造プロセス
	TU Wien (Austria)	エタノール発酵
	Institut de Biologie Structurale et Microbiologie, Centre Nationale de la Recherche Scientifique (France)	酵素糖化技術

4. 調査結果および国際比較

4.1 開発戦略

表 4.1 に開発戦略の比較を示す。米国は輸入原油への依存脱却を明確に謳って、輸送用燃料をバイオマスで代替する方針を出している。2025 年までに輸送用の燃料の3分の1をバイオマス起源の燃料に置き換える、としており、そのために木質バイオマスの主成分であるリグノセルロースを活用するための研究開発に重点化している。また、バイオマス利用を大きな産業に育成することを戦略の一つにしており、その中核として石油のリファイナリに対抗するバイオマスリファイナリという概念を打ち出し、燃料だけでなくバイオマス起源の様々な化学物質を作る、という構想を提示している。一方欧州では欧州委員会が、2020 年までに最終エネルギー消費量の 13%をバイオマスによってまかなうという目標を設定した。特に輸送用燃料については、2010 年までに需要の約 6%をバイオマスからの代替燃料に、さらに2030 年には 25%にする目標が掲げられている。現在のバイオマス代替輸送用燃料は、需要の 1%未満のシェアでしかないことから、さらなる研究開発を必要としている。バイオマスの利用率はEU各国で大きく異なる。オーストリアはすでに総エネルギー消費量の約 12%を、フィンランドでは約 20%をバイオマスで賄っており、その殆どが両国に豊富に存在する木質系バイオマスによるものである。そのため両国を始め、EU内の研究はリグノセルロースの変換技術に最も重点を置いている。また欧州化学薬品産業界を中心に「White Biotechnology」構想が立ち上げられ、産業界でバイオマスリファイナリの促進をはかる動きが見られる。これはEUの次期長期研究計画のFP7でも取り上げられることになっている。訪問先のフィンランドの VTT はその中核を担う研究機関となる。

これに対し日本では「バイオマス・ニッポン総合戦略」の下で、バイオマスタウンでの実証、NEDO のバイオマスエネルギー高効率転換技術開発、バイオマス等未活用エネルギー実証試験などで、多様な開発と実証研究がすすめられている。導入目標はエネルギー需要に対する比率ではなくバイオマスの発生量に対する利用割合となっている。需要側については2005年3月に総合資源エネルギー調査会が出した、2010年までにバイオマスの熱利用を石油換算308万kにするという目標がある。また技術上の目標は、直接燃焼やガス化、メタン発酵など第二世代技術が中心となっている。第三期科学技術基本計画のエネルギー分野推進戦略の柱として、「運輸部門を中心とした石油依存からの脱却」が加えられ、代替燃料の重要性は認識されているが、バイオマス起源の液体燃料製造技術は戦略重点科学技術に含まれていない。

表 4.1 日米欧バイオマス戦略比較

	日本 (バイオマス・ニッポン総合戦略他)	米国	欧州
目的	<ul style="list-style-type: none"> ・地球温暖化の防止 ・循環型社会の形成 ・戦略的産業の育成 ・農林漁業、農山漁村の活性化 	<ul style="list-style-type: none"> ・石油依存度の低減 ・バイオエネルギー産業創出 ・地球温暖化の抑制 	<ul style="list-style-type: none"> ・地球温暖化の防止
普及目標	<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄物系: 80%以上利活用 ・未利用系: 25%以上利活用 ・資源作物: 10 万トン程度利活用 ・2010 年度までに熱利用 308 万 k 	道路運輸用燃料をバイオマス起源に置換 2015 までに需要の 1/10 2025 までに需要の 1/3	EU (当時 15 ヶ国) 全体で、2020 年に最終エネルギー消費量の 20%を再生可能エネルギーに。そのうち 65%をバイオマスでまかなう。
技術目標	<ul style="list-style-type: none"> ・直接燃焼 or ガス化プラント処理量 20t/d: 発電効率 20%、同 100t/d: 同 30%程度 ・メタン発酵(5t/d): 発電効率 10% ・プラスチック: 200 円/kg 程度 	<ul style="list-style-type: none"> ・2010 までに農業残渣を用いる大規模バイオマスリファイナリ構築 ・エタノールの原料をトウモロコシからリグノセルロースに転換 コスト\$1.07/gal 	<ul style="list-style-type: none"> ・燃焼の際の汚染物質、腐食等の問題の解決 ・低投入型多年生作物の開発 ・セルロースなどからの液体燃料への変換技術 ・リグノセルロースの生物変換プロセスの解明

4.2 研究開発

表 4.2 に日米欧の研究開発の比較を示す。より詳細な比較は第6章の詳細比較表に示してある。米国はトウモロコシからのでん粉によるエタノール発酵が産業として成立しており、次の重点課題としてリグノセルロースの生化学糖化によるエタノール生産と、ガス化経由の燃料生産、および糖・アルコールを中間物質とした化学物質生産(バイオリファイナリ)の3つの分野に収束してきている。特に最大の課題とされているのがリグノセルロースのエタノール発酵のための前処理・分解糖化技術である。欧州も、バイオディーゼルの技術はほぼ実用レベルになったとして、木質バイオマスの生化学糖化、ガス化、および化学物質生産の研究開発に絞っている。

生化学糖化に関してはバイオマスの細胞壁構造を詳細に解明する研究や、トウモロコシのセルロースの糖化技術で米国が一步進んでいる。欧州は糖化酵素セルラーゼの高活性化に関する研究でこれに並んでいる。日本は、セルラーゼやリグニンの生化学分離で特徴的な研究があるが、全体としては米・欧より一步遅れている。酸を使わない前処理のひとつの方法として超臨界水や亜臨界水処理あるいはメカノケミカルな処理との併用技術が考えられているが、日米欧いずれも実用化には至っていない。

糖のエタノール発酵に関しては、日本は優れた酵母技術を持ち、欧・米と同等のレベルにあるといえる。特に酵母の表層を操作し糖化と発酵を同時に進める技術など優れた成果が出ている。

ガス化技術については、欧・米が日本より一步先んじている。現在の最重要課題はガス化に伴うタールの発生防止、ないしは分解であり、米は緻密な温度制御による発生抑制と、タール分解触媒の開発で、欧州はガス化プロセス制御による発生抑制で先行している。また、米・欧ともにガスを液化して液体燃料や有用化学物質へ変換する技術を並行して進めている。

液体燃料と有用化学物質を併産するバイオマスリファイナリは米国の戦略のもう一つの柱であり、そのためのシュガープラットフォーム技術を開発中である。欧州も生化学技術を化学物質生産に使う Industrial Biotechnology (White Biotechnology) 構想がある。

表 4.2 日米欧研究開発比較

プロセス	日本	米国	欧州
前処理 分解糖 化	・微生物による選択的脱リグニン法開発中	・細胞壁構造分析まで踏み込んで前処理技術を開発中	微生物による選択的脱リグニン法開発中
	・NEDO濃硫酸処理+酵素糖化 ・水熱+酵素糖化(大学他) ・セルラーゼ、セルロソームの高機能化研究推進中 ・白色腐朽菌によるリグニン分解除去技術開発中	・希硫酸+セルラーゼによる糖化 ・トウモロコシstover糖化の酵素コストを1/30にする技術を開発(2005年) ○ ・木質に対しては peroxymonosulfate処理、過酸化水素-金属塩処理、アンモニア爆砕、ソルボリシス処理、NaOH処理等開発中 ・微生物育種による酵素開発推進	・酸触媒やセルラーゼ、ヘミセルラーゼ、嫌気性細菌のセルラーゼ複合体(セルロソーム)等によるリグノセルロース分解技術開発中
水熱処理	分解・糖化技術として研究推進	やや低調、一部で前処理技術として研究	× 超臨界流体法による分解の研究はあまり行われていない
発酵	・C5/C6並行発酵技術開発中 ・酵母表層を操作し、糖化と発酵を同時に進行できる技術	・C5/C6並行発酵酵母開発、実用化試験中 ・育種対象ザイモナス系から酵母へ転換中	リグノセルロース由来炭水化物(グルコース、キシロース、アラビノースなど)に対する微生物、バクテリア、酵母の育種推進中
リグニン 変換	生化学的変換技術開発中	ガス化経路で液体燃料、化学物質に変換する計画	ガス化後、微生物を使ってエタノールに変換する技術を開発中
BDF変換	均相触媒法のプラントが多いが、品質規格未確立。固体触媒や、超臨界アルコール法など、遊離脂肪酸含有量が多い物質対応技術開発中	均相触媒法が中心。品質規格も設定し高品質なBDFの製造。遊離脂肪酸含有量が多い材料への対応開発中	均相触媒を用いた変換ではプラント技術を確立。世界をリード。税優遇措置も含め社会システムが整っている。超臨界流体などの新規変換方法についてはあまり研究が行われていない。
ガス化	タール対策にフィルタおよび触媒開発中	・ガス分離膜、低コストタール分解触媒で進展 ・タール発生極低の分散型ガス化装置開発済み、実用化レベル	・タールの発生が少ないガス炉開発 ・長期目標として、リグノセルロースをガス化後に微生物変換を用いるエタノール変換技術開発中
材料併 産	・ポリ乳酸等、生分解プラスチック製造の個別技術開発推進中	・バイオマスリファイナリを指向 ・シュガープラットフォームを提案、汎用性のある12種類の間物質(糖、有機酸)を選定	・欧州バイオ産業協会を中心とした「White Biotechnology」構想 FP7「Industrial Biotechnology」 ・抗生物質、アミノ酸、ポリ乳酸等の合成技術開発中
炭化	○ 常圧フラッシュカーボニゼーション	加圧フラッシュカーボニゼーションによる高速炭化	

(1)米国の状況

バイオマス研究の中心となっている National Bioenergy Center は、NREL が統括しているコンソーシアムで、Argonne National Lab.(ANL)、Idaho National Engineering Lab.(INEL)、Pacific Northwest National Lab.(PNNL)、Oak Ridge National Lab.(ORNL)が参画している。ANL は化学工学、INEL は収穫技術、PNNL は触媒研究とマテリアル利用、ORNL は作物研究を担当しており、今回の調査の中核である第三世代変換技術は NREL が主として担当している。

作物の育種については、これまで Department of Agriculture の研究機関が担当してきたため、NREL は遺伝子操作による育種等を手がけていなかったが、昨年 Genomics Lab.を新設し、育種研究も開始した。さらにバイオマスの細胞レベルの構造を解明し、前処理技術の高度化を図る目的で 2005 年に BSCL(Biomass Surface Characterization Lab.)を設置した。

(a)前処理・分解糖化

前処理はバイオマスの変換において非常に大きい役割を持っている。バイオマスは、糖、でん粉、油脂など、発酵やエステル化反応によって容易に液体燃料に変換できる成分の他に、リグニンやセルロース、ヘミセルロースなど分解しにくい成分を含んでいる。現在の米国のエタノール生産の中核であるトウモロコシでも、従来使っている実の部分はでん粉が主体であるが、stover と呼ばれる皮や芯、茎などはリグニンやセルロースが主成分である。また発生量が最も大きい木質バイオマスは、ほとんどがこれらリグノセルロースからなっている。これらを発酵あるいは合成の原料となる糖に分解するのが前処理・分解糖化である。また、リグノセルロースは固体であり、リグニン、セルロース、ヘミセルロースが複雑に絡まって存在している。その成分比も形態もバイオマスの種類によって異なるため、前処理技術はバイオマスの種類ごとに開発が必要である。

NREL の方式ではトウモロコシの stover や草本類のような、いわゆるソフトバイオマスは希硫酸によってヘミセルロースを分解した後、セルラーゼ酵素によって糖にする。そのための酵素使用量は発酵のための酵素の量に比べ非常に多かったため、全体のコストを押し上げ、でん粉からのエタノールに比べて、生産コストが数倍であった。これに対し NREL は Genencor、Novozymes 両社と協力し、糖化酵素のコストを 10 分の 1 にするためのプロセス・酵素開発を行った。その結果 2004 年に両社ともに 20 分の 1 から 30 分の 1 に低減できる技術を開発しており、日・欧に対し一歩先んじている。ただし、トウモロコシ等のソフトバイオマスについては日本では生産量が少ない。

一方木質に代表されるハードバイオマスに対しては、高温水(超臨界、亜臨界)、アルカリ、爆砕などと酵素を組み合わせた方式を様々な機関で開発中であるが、実用レベルには至っておらず、わが国と同レベルといえる。ただし、NREL は 2005 年に BSCL(Biomass Surface Characterization Lab.)を建設し、各種の電顕や分析装置を使ったバイオマスの組成や細胞壁等の構造を解明し、前処理に反映するという、全量利用に向けた基礎科学的な研究を進めつつある。この点では日本、欧州に比して進んでいる。

セルロース糖化酵素の開発に関しては長岡技科大や大阪府立大でカビの菌が生産するセルラーゼの構造解析や高機能化が進められている。三重大ではセルラーゼの集合体であるセルロソームの研究も進んでいる。セルロソームは単独の酵素よりも高い酵素活性を示すことからコスト低減に有望な技術である。また京都大学、RITE 他では木材に含まれる糖化困難なリグニンを白色腐朽菌を用いて分解、除去する研究が進められている。

(b) エタノール発酵

エタノール発酵の課題はセルロースを分解して得られるグルコースなどの C6 糖(炭素が6個つながった糖)とヘミセルロースから多く得られる C5 糖が共存するときに、並行して発酵させる技術の開発である。従来から使われている酵母やザイモナス菌などは、C6 糖の発酵機能は持っているが、C5 糖を発酵させることが出来ない。C5 糖を発酵させることの出来る菌もあるが、アルコール耐性が弱いなどで使うことが出来ない。現状は酵母やザイモナス菌等に、C5 糖を発酵できる遺伝子を導入して、並行して発酵できる技術の開発が進められている。Purdue 大学の Ho 博士のグループは C5 糖の代表であるキシロースの発酵機能を付与した並行発酵酵母 Purdue Yeast を開発し、カナダの logen 社によって採用されている。また NREL でもザイモナス菌をベースに C5 糖発酵機能を付与する育種が行われてきている。しかし産業界からはより安心であるとの理由で酵母ベースの開発の要請があり、酵母にシフトしている。

日本でも鳥取大学を始めとして多数の機関で C5/C6 並行発酵菌の育種が進んでいる。これに加え神戸大学、京都大学等では酵母の表面に他の機能を付与してキシロースだけでなく、他の糖やセルロースそのものを直接発酵させるアーミング酵母の育種研究が行われている。

(c) リグニンの変換

リグニンはベンゼン環を持つ複雑な三次元構造をしており、現在開発されている分解糖化技術では分解できない。このため NREL では、当面リグニンについては後述するガス化技術によっていったんガス化した後、触媒反応により液体燃料や有用な化学物質に変換する、という方法を開発中である。また製紙工程の残渣として出てくる黒液の主成分のリグニンを材料として使う試みは、一部低付加価値材料としては実用化されているが、より高付加価値のポリマー等への変換は研究の段階である。

日本でもポリマーへの変換を始め多様な研究が進んでいるが、実用化レベルのものはリグノフェノールなどごく一部である。京都大学、RITE 他ではリグニンを白色腐朽菌によって分解する研究が進められている。

(d) ガス化

ガス化自体は廃棄物を中心に以前から開発が進められているが、内燃機関での使用や上記のようなガス化後に液体燃料やその他化学物質への変換を行う場合、質の良いガスを得ることが最重要課題である。その最大のネックはガス化に伴って発生するタールの除去ないしは分解である。

小型分散ガス化設備の研究開発として唯一 NREL が資金供与をしている CPC (Community Power Corp.) 社は、単純なフィルタによりタール除去を行っているが、ガス化炉の温度を精密に制御することにより、タールの生成量を極めて低く抑え、一年以上フィルタの交換が不要な技術を開発している。これは非常に完成度の高い技術である。

また NREL では大規模ガス化のため、タールを分解する Ni 触媒の研究とフィルタによる除去の研究を行っている。GTI ではガス化によって直接水素を製造する研究も行われており、その際生成した二酸化炭素を Ca ベースの膜によって連続的に除去するというユニークな開発も進んでいる。

日本でも筑波大学他で Ni 触媒よりもタール分解性能を持つ触媒が開発されている。また三菱重工や産総研ではガス化経路でメタノールや DME を作る開発が進められており、ほぼ同レベルとおもわれる。

(e) 材料併産

DOE はバイオマスをエネルギーだけでなく、石油化学に代わる化学物質と燃料を併産するバイオマスリファインリーの構想を進めている。そのためシュガープラットフォームという概念により、汎用性のある技術群を戦略的に開発する計画である。

これは、バイオマスを一旦糖や有機酸等の中間物質に分解しておき、それらをビルディングブロックとして用いて付加価値の高い化学物質に変換・合成するというものである。2004 年にそのための最も汎用性の高い12種類の中間物質(糖、有機酸など)を選定している。この方式は、それぞれの分解技術や変換・合成技術を個々に切り離して並行開発できるという利点がある。

また、Hawaii 大学では、燃料電池の電極等に使うため、バイオマスを高温高压で短時間に炭化する技術を開発している。

(2) 欧州の状況

EU のエネルギー政策は、欧州委員会が 2000 年 11 月に策定した「エネルギーの供給安全に関する欧州戦略に関するグリーンペーパー」に基づいて行われている。このグリーンペーパーでは、バイオマスを代替燃料として利用拡大を押し進めるとしている。これは 2002 年からの第六期フレームワークプログラム (FP6)でも受け継がれ、持続可能な発展 / 地球変動のエコシステムの「持続可能なエネルギーシステム」の中で、バイオマスは運輸部門の代替燃料、発電燃料として重要研究項目として設定されている。

バイオマス研究は欧州各国で行われているが、特に、フィンランド、オーストリア、ドイツ、フランスなどで活発である。拠点の一つは、フィンランドの VTT で、半民間の組織において、基礎研究から実用化まで、生化学からガス化まで幅広く行い、米国や他の EU 諸国の企業、大学と多くの共同研究を行い、先導的な役割をしている。

(a) バイオディーゼル原材料

欧州で利用が盛んな BDF (バイオディーゼル燃料)の原材料として、菜種油や大豆油などの植物油、廃植物油が用いられている。これら材料の変換技術、周辺技術は高いレベルにあり、ほぼ確立している。植物油だけでなく、動物油脂を原料とする大規模プラントも建設され、材料の多様化を行っている。生産増加に伴い、安い材料の大量確保が最も重要な課題となっている。今後、利用可能な原料を増やすために、非食用油を合成する植物の開発プロジェクトも行われている。日本では基本的に廃食用油を想定した研究開発が行われている。一部、地域性を考慮した菜種など植物油の利用例があるが、動物油脂の利用はまだ行われていない。どの原料油の利用技術も、欧州に比べ遅れている。

(b) BDF 合成反応

欧州ではブラジル、米国のように発酵性の糖材料が容易に手に入らないため、バイオエタノールよりも、油脂を原料とする BDF の生産が盛んである。欧州での BDF 製造プラントでは均相触媒 (均一塩基触媒法) が用いられており、生成物中から触媒を分離回収後に固体肥料に変換する技術を確立している。この手法では世界で最も進んでおり、BDF 製造メーカーはそれぞれのノウハウを有し、技術競争力を保持している。遊離脂肪酸含有の多い油脂には適用の限界があるものの、様々な油脂類を原料とするためには均相触媒を用いた合成法が最も適していると認識されているため、新規合成法 (超臨界水など) の研究開発は積極的には行われおらず、より品質の高い BDF 製造を目指した精製技術に関する研究

に重点がおかれている。日本では現プラントでは均相触媒が用いられているものの、新規触媒や、超臨界水などの研究に重点が置かれている。

(c) 前処理・分解糖化

バイオマス資源の大半を木質バイオマスに頼っている欧州では木質バイオマスの高度利用は重要な研究課題となっている。特に木質バイオマスの主成分であるリグニンやセルロース、ヘミセルロースの分解は重要課題である。これらの研究は、日本同様基礎研究レベルであるが、主に生化学に注力しているのが特徴である。セルラーゼ(セルロース分解酵素)を生産する糸状菌などの研究が活発に行われ、VTT、ウィーン工科大学などでは代謝工学を利用して生産性の改善に取り組んでいる。規制が厳しいものの、遺伝子組み換えの取り組みも行われている。またフランスの CNRS は、VTT との共同研究で、セルロース分解活性が高いセルロソーム(セルラーゼ複合体)を生産する好熱嫌気性セルロース分解細菌の研究を行っている。糸状菌の研究に比べ、基礎研究の段階だが、日本と比べ研究は進んでおり、世界を先導している。

(d) エタノール発酵

欧州ではブラジルのようなサトウキビなどの糖材料が少ないことから、エタノールの生産はそれほど多くはない(フィンランドではバイオ燃料としての生産は行われていない)。欧州でのエタノール大量生産のためには、木質バイオマスの分解、糖化が必要と考えられ、研究が行われている。VTT では C6 糖であるグルコースと C5 糖であるキシロースの酵母による発酵技術を代謝工学を用いて改良を行っている。また菌株の収集や、メタゲノミックスの手法によって酵素のスクリーニングを行っている。長期的な研究として、木質などをガス化した後、微生物によってエタノール変換を行う研究が行われている。IFA-TULLN でも BDF 生産が中心ではあるが、リグノセルロース由来炭水化物を 60 で発酵する菌などを発見し、効率的な連続発酵構築の試みが行われている。

(e) ガス化

バイオマスのガス化は欧州でも大きな伸びを示しており、BDF などのバイオ燃料より普及、利用されている。原料は、鶏糞や下水汚泥、都市系廃棄物などが主流となり、ドイツ、スイス、フィンランドなどでプラントが稼働している。木質バイオマスを原料としたガス化装置の開発が行われているが、タールの処理が大きな問題となり、経済的に成り立つプラント構築までにはいたっていない。VTT では、企業との共同研究で、ガス化プラントの実用化を目指し、新規の一般型ガス化発電システム“Novel power plant system”を開発している。このシステムは、改良された updraft 型ガス化装置で、木材チップ、おがくずなど様々な木質バイオマスを燃料として利用でき、タールも炉内で熱分解し少なくできるとしている。発生したガスでレシプロエンジンを用い、発電することで、高い発電効率を得ることができる。発電コスト(建設費込み)は5セント(1ユーロ145円として、7.25円)/kWhと極めて低廉を達成できるとしている。日本のガス化プラントは、輸入した欧州のプラントを基礎に開発が行われてきたが、現在は同等の技術レベルまで追いついている。

(f) 材料併産

欧州産業界、特に欧州バイオ産業協会(EuroBio)を中心に、「White Biotechnology」と称して産業界へ

のバイオテクノロジーの応用を推し進めている(医療への応用を Red Biotechnology、農業への応用を Green Biotechnology と称している)。これは欧州委員会の次期フレームワークプログラム FP7 の9つの重要テーマの一つ、「Food, Agriculture and Biotechnology」に取り上げられることになっている。

ファインケミカル、バルクケミカルとも研究は盛んで、抗生物質、ビタミン、キシリトール、アミノ酸などのファインケミカルや、生分解性ポリマーの研究が行われている。特に、木質(紙、パルプ産業)からのケミカル抽出の試みが行われ、樹皮からのスペリン抽出、パルプミルからのトーン油、脂肪酸、パルプ廃油からのフェノール類、メタノール、炭水化物などケミカル抽出を行い、高付加価値化を目指している。

5. まとめ

最新のバイオテクノロジーや熱化学に基づく第三世代バイオマス利用技術に着目して、欧・米、および国内の戦略および研究開発状況を調査し、比較した。これらの結果を踏まえ、今後重点的に推進すべき課題として以下を提案する。

ハードバイオマス前処理・分解糖化技術

国内では、伝統的な醸造技術を基礎にした発酵技術が高いレベルにある。しかしながら、発酵の材料である糖を得るための前処理・分解糖化技術は、欧・米に比べやや遅れている。バイオマスを将来の代替燃料として利用するには、安価な材料を大量に確保することが必要になる。そのため、賦存量が最も大きい木質バイオマスの利用が重要であり、難分解性の成分であるリグニン、セルロース、ヘミセルロースを分解糖化する技術が必要不可欠である。トウモロコシ等のソフトバイオマスの前処理・分解糖化技術に関しては米国が一步先んじているが、ハードバイオマスである木質の分解糖化技術は、欧米ともにまだ実用化までには解決すべき多くの課題がある。わが国でも酵母を始めとする生化学技術の基盤があり、それに基づく前処理・分解糖化技術の研究開発を強化することにより、優位にたてる可能性がある。主として対象とするバイオマスは、アジアにおいて大量に再生生育しうる木質とすべきである。主な課題は以下のとおりである。

- ・ わが国およびアジア諸国のハードバイオマスの細胞壁詳細構造解明
- ・ 前処理技術
- ・ 無酸リグニン分離・糖化技術
- ・ リグニン分解微生物の育種
- ・ セルラーゼ、ヘミセルラーゼ生産微生物の育種
- ・ 高活性糖化プロセス

液体燃料・材料併産技術(バイオマスリファイナリ技術)

原油から燃料を含めた様々な化学製品を作り出すオイルリファイナリに代わり、バイオマスを材料として様々な化学製品を作り出すバイオマスリファイナリの研究開発に欧米とも注力している。特に米国では、DOE を中心としてセルロース、ヘミセルロースから糖を作り出し、その糖を材料とした新たな化学産業の構築を可能にする技術開発を積極的に行っている。これにはデュポン社やカーギル・ダウ社なども参加しており、2010 年までにバイオマスリファイナリを建設する計画が具体化している。欧州においても、次期フレームワークプログラム(FP7)においてバイオマスリファイナリの積極推進を予定している。

我が国では「バイオマス・ニッポン総合戦略」においてバイオマスリファイナリの必要性を掲げているものの、研究投資が十分に行われているとは言えない。一方、欧・米では、木質成分のリグニンを燃焼、ガス化によって利用するにとどまっているに対し、国内ではリグニンを機能性分子素材として利用する試みなど、ユニークな研究が進められている。現在、我が国のオイルリファイナリ技術は高い技術競争力を維持しており、今後の産業競争力維持のため、長期的視野にたったバイオマスリファイナリ技術の開発推進が必要である。主な課題は以下のとおりである。

- ・ バイオマスから合成しうる有用物質および変換プロセスの探索
- ・ 生化学変換プロセス
- ・ 生化学変換に用いる微生物の育種
- ・ 熱化学分解・ガス化プロセス
- ・ タール除去技術
- ・ 液体燃料・有用物質合成触媒
- ・ 生成物分離技術(膜技術等)
- ・ 最適トータルシステム

6. 細技術比較表

本調査参加者による各要素技術(前処理、エタノール発酵、マテリアル生産、ガス化、バイオディーゼル、炭化技術)の国際比較を取りまとめたものを詳細技術比較表として次項以降に示す。この詳細技術比較表を元に、当センターで表 4.2 をまとめた。

7. 謝辞

本報告書作成にあたり多大のご協力を頂き、有益な意見交換を賜ると共に、研究設備の視察を快くお引き受け頂いた訪問先各研究機関、並びに現地に対応頂いた研究者の皆様、また訪問先・調査内容選定、そして現地調査にご協力頂きました東京大学 横山 伸也教授を始めとするパネルメンバーの皆様に心より深謝いたします。また文科省、JST 国際室、およびパリ事務所には現地との交渉等多大なご協力を頂きました。関係各位にはお礼申し上げます。

表 6.1 詳細技術比較表

分野	技術	日本		米国		欧州	
前処理 (天野、坂、粟冠、塚原、横山、渡辺)	バイオマス前処理評価系		リグニン化学、糖質化学など木材成分化学の基礎研究はトップレベルであるが、バイオマス糖化前処理と植物細胞壁構造の相関に焦点を当てた研究は米国が先行している。		分子ビーム質量分析器(MBMS)、FTIR、LC-MS、NIR、などによるバイオマス変換プロセスのための迅速成分定量、表面分析系を開発しており、欧州、日本に対して先行。分析のon line化を目指している。		リグニン化学、糖質化学など木材成分化学の基礎研究はトップレベルであるが、バイオマス糖化前処理と植物細胞壁構造の相関に焦点を当てた研究は米国が先行している。
	ソフトバイオマス糖化前処理		日本のバイオマス事情を反映してソフトバイオマス前処理の研究事例はハードバイオマスに比較し少ない。水熱前処理などの基礎研究が進行中。		希硫酸前処理法が、実用化のフェーズに入っている(NREL)。炭酸ナトリウム処理(Athenix Corp.)、アンモニア水溶液処理、水熱処理等の前処理研究が進行中。ハンマーミル、水蒸気爆砕前処理を組み合わせたムギワラからの酵素糖化法エタノール生産が実用化(IOGEN カナダ)。		爆砕、アルカリ酸化処理、水熱処理、粉碎処理などが、公設研究機関で研究されている。主として水熱前処理を用いたムギワラからのエタノール生産に関するEUプロジェクトが2002年12月にスタート。100 kg/hのパイロットプラントが稼働。オランダで ムギワラのCa(OH) ₂ 前処理プロジェクトが進行中。
	ハードバイオマス糖化前処理		公設研究機関で化オゾン処理、腐朽菌処理、粉碎処理、超臨界水処理、亜臨界水処理等に関する独自性の高い基礎研究が行われているが、実用化に移行するフェーズには移っていない。		希硫酸前処理法は一部の広葉樹材に適用可能である。希硫酸前処理法は針葉樹には適さない。peroxymonosulfate処理、過酸化水素-金属塩処理、アンモニア爆砕(ミシガン州立大)、ソルボリシス処理(UBC、カナダ)、NaOH処理等が研究されている。		爆砕、アルカリ酸化処理、水熱処理、粉碎処理などが、公設研究機関で研究されている。
	生物的前処理		生物的脱リグニン法(京都大学) 亜臨界処理による脱リグニンおよび糖質分解(京都大学) 他多数有り				生物的な選択的脱リグニン法およびバイオミック脱リグニン法(TUWien)
	リグノセルロースからのバイオエタノール製造		・濃硫酸法(日揮株)、希硫酸法(月島機械株)などが米国より技術輸入した手法により、実用化に向けた検討を行っている。基礎研究の段階では超臨界水法(京都大学など)、爆砕-酵素糖化発酵法(金沢大学など)、マイクロ波ソルボリシス-酵素糖化発酵法(京都大学)等がある。		・酵素(セルラーゼ)法によるセルロース糖化と微生物によるエタノール発酵;セルラーゼのコスト低減で実用化の可能性が視野に ・Arkenol社による濃硫酸法での糖化とDNA組換え <i>Zymomonas mobilis</i> によるエタノール発酵 ・BC Internationalによる希硫酸法での糖化とDNA組換え大腸菌(KO-11)によるペントースのエタノール発酵 ・MASADA社による濃硫酸法での都市固形ゴミの糖化とエタノール発酵(Arkenolプロセスに近い)		・スカンジナビア3国での亜硫酸パルプ廃液中の糖を原料とするエタノール生産 ・リグノセルロースの酵素糖化とそれに続くエタノール発酵(DNA組換え技術にはあまり積極的でないが研究は行っている)

分野	技術	日本	米国	欧州		
前処理 (天野、坂、粟冠、塚原、横山、渡辺)	セルロース無酸糖化	水熱法およびメカノケミカル法によるセルロース系バイオマスの糖化(産総研)	亜臨界水処理と酵素による糖化(Purdue大)			
		水熱反応と酵素反応の組合せで、酸を使用しないで木質バイオマスのセルロースを糖化 ハワイ大学とほぼ同条件(産業技術総合研究所):右に同様の結果	水熱反応と酵素反応の組合せで、酸を使用しないで木質バイオマスのセルロースを糖化(ハワイ大学) 220、1~2分の処理:ヘミセルロースのほとんどとリグニンの半分が可溶化			
		耐熱性酵素によるセルロース分解(産業技術総合研究所、海洋研究機構) 高圧水熱処理とバイオリアクターからなるハイブリットリアクター(信州大学)		ミニセルロソームによるセルロース分解(CNRS)		
	バイオマス糖化用セルラーゼ開発	セルラーゼの機能研究については、トップレベルにあるが、バイオマスの糖化発酵プロセスにおけるセルラーゼ生産コストの削減に関する研究に関しては、米国に大きく遅れをとっている。個別のバイオマス、前処理法に適したセルラーゼの開発プロジェクトが必要である。	エタノール発酵におけるセルラーゼのコストを削減するDOEのプロジェクトにより、ソフトバイオマス糖化用セルラーゼの開発では世界をリードする(Genencor International, Novozymes)。	セルラーゼ生産コストの削減に関するDOEプロジェクトに参加したNovozymes社はデンマークに本社があり、技術レベルは高い。大学などにおけるセルラーゼの機能研究についても、トップレベルにある。		
	変換用酵素の大量生産	糸状菌酵素の大量発現(長岡技科大)		代謝工学を用いた酵素生産系(TUWien)		
	嫌気性細菌のセルラーゼ複合体(セルロソーム)によるリグノセルロース分解	研究対象とする嫌気性細菌	Clostridium josui, Clostridium thermocellum(三重大学)		Clostridium cellulolyticum(CNRS)	
		セルラーゼ遺伝子の単離と発現	多数あり		多数あり	
		セルロソーム成分の立体構造解析	×	少数のみ		異なるファミリーに属す触媒ドメインやコヘシンなどの解析例が多数あり
		宿主?ベクター系の開発とin vivoにおける遺伝学的解析	×	確立されていない		プラスミド導入、アンチセンスRNA、相同組換えなどの手法を確立
		ハイブリッドセルロソームの構築		キメラ骨格タンパク質は作られている		2?3種の結合特異性の異なるキメラ骨格タンパク質を用いたハイブリッドミニセルロソームを構築。ただし天然のセルロソームの活性には及ばない
ゲノム解析	×	部分的な解析のみ		米国DOE JGIにおいて実施中		

分野	技術	日本	米国	欧州
エタノール発酵 (天野、塚原、横山)	システム化	凝集性酵母を用いる繰返し回分発酵法、建築廃材からのエタノール生産(NEDO)	バイオマスからの熱化学的前処理-酵素糖化によるエタノール発酵(NREL)	
	酵母の育種	細胞表面工学技術によるデンプン発酵酵母やセルロース発酵酵母の育種(神戸大学他) 凝集性酵母に耐熱性・対塩性を付与する育種(熊本大学) ペントース代謝系酵素遺伝子を導入したペントース発酵酵母の育種(研究例多数)	ペントース代謝系酵素遺伝子を導入したペントース発酵酵母の育種(Purdue University)	
	細菌の育種	ペントース代謝系酵素遺伝子を導入したZymomonasの育種(鳥取大学他)	ペントース代謝系酵素遺伝子を導入したZymomonasの育種(NREL)	
	発酵効率	産総研では最近発酵技術とリンク	ハワイ大学:ダートマス大学との共同研究(発酵効率90%)	
	アルコール発酵	細胞表面にセルラーゼを固定化した酵母による並行複発酵(神戸大学)		キシロース・アラビノース発酵能を付与した酵母の育種(VTT)
	トータルシステム	全てを網羅したシステムはまだない		実用化レベルに達する技術にはない
	マテリアル生産 (横山、渡辺)	セルロースの利用	特になし	微結晶セルロースの製造
リグニンの変換		リグニン系ウレタンポリマー、リグニン系接着剤、リグニン系ポリマープレンドー、リグニン系炭素材料の生産などの応用研究が公設研究機関で行われている。リグノフェノールなど一部は実用化研究が進行中であるが、サルファイトリグニンを除くと産業化の実例は少ない。糖化発酵残滓として回収されるリグニンの化学資源化研究では、米国に遅れを取っている。	バイオマスの糖化発酵残滓として得られるリグニンのガス化によるSyn gasの生産、精製、利用に関して、実用化に即した実践的研究を実施中(NREL)。ウレタンポリマーなどリグニンの高分子分野への応用研究も行われている。Gerogia-Pacific社などがリグニンスルホン酸を製造。Westvaco社はクラフトリグニン製品を製造。	リグニン系ウレタンポリマー、リグニン系接着剤、リグニン系ポリマープレンドー、リグニン系炭素材料の生産などの応用研究が公設研究機関で行われている。ノルウェー、スウェーデン、米国などに拠点をもち多国籍企業Borregaard Ligno Tech社がバニリンを製造。
ガス化、ガス化経由の液体燃料生産 (坂、塚原、花岡)	システム化	バイオマスからの噴流床ガス化経由メタノール製造(三菱重工、長崎総合科学大学) バイオマスからの合成ガス経由液体燃料(DME)製造(固定床:産総研、スラリー床:NKK)	ガス化-タームクラッキング-MoS2触媒によるエタノール製造(NREL) 数キロワットから百キロワット程度の小型自動ガス化発電装置パッケージ(CPC)	

分野	技術		日本	米国	欧州	
ガス化、ガス化 経由の液体燃 料生産 (坂、塚原、花 岡)	バイオマス の ガス化合成ガス を用いたバイオエタノール生 産		×	・ガス化合成ガスよりのアルコール製 造はもっぱらメタノール生産(三菱重 工業)であり、エタノールへの変換につ いては我が国では試みられていない ・アジア地域では、マレーシア、イラン の研究者によるH ₂ 及びCOからの酢酸 菌(<i>Clostridium ljungdahlii</i>)を用いたエ タノール生産が報告されている	・バイオマスを熱分解してCO、CO ₂ 、H ₂ を含む合成ガスとし、エタノール生産 嫌気性菌でエタノールを生産(米国、 アーカンザス大学) ・バイオマスのガス化合成ガス(CO、 CO ₂ 、H ₂)よりMoS ₂ 触媒によるエタノ ール生産(NREL)	・バイオマスのガス化合成ガス(CO、 CO ₂ 、H ₂)よりの酵素によるエタノール 生産、詳細は明らかにされていない。 現在計画段階か?(VTT)
	加圧直接ガス化			流動床方式二段ガス化炉(荏原製作 所)、噴流床方式微粉炭ガス化炉(三 菱重工業)	加圧流動床ガス化炉(GTI)、	
	生成ガスの選択性向上			研究例多数	水素分離膜による水素製造(GTI)	
	タール・硫黄化合物除去			Rh触媒を用いた低温タールクラッキ ング(筑波大学)、活性炭(JFE)	Ni触媒を用いたタールクラッキング (NREL) プラズマを用いたタールクラッキ ング(GTI)	
	吸着剤、膜を用いたガス化ガ スからの不純物分離			活性炭を用いたガス化ガスからのター ル、硫黄化合物の除去 (JFEエンジニアリング、産業技術総合 研究所)	Caベース膜を利用したガス化ガスか らのCO ₂ 、H ₂ S分離(GTI)	
	CO水素化による液体燃料製 造			バブルカラムリアクターを用いたCO水 素化による炭化水素燃料製造(富山 大学)	多数有り	
バイオディーゼ ル(化学変換に よる液体燃料生 産) (北川、坂)	BDF原料油	植物油	×	原料として、基本的には廃食用油を想 定しており、菜の花油や紅花油など地 域性を活かした植物油を用いる自治 体もある。しかし、動物油脂の利用は まだ行われておらず、ジャトロファな どの非食用油を合成する植物の開発研 究なども行われていない。		原料として、菜種油や大豆油などの植 物油、廃食用油を用いる技術は完成 しており、動物油脂を原料とする大規 模プラントも建設されている。ただし、 原料の遊離脂肪酸含有量は20%以下 という制限がある。さらに、利用可能な 原料を増やすために、非食用油を合 成する植物の開発プロジェクトも行わ れている。
		廃食用油				
		動物油脂	×			
		非食用油	×			
	原料調達法	(京都のみ) × (我が国全 体)	・廃油脂(レストラン、家庭など)を利 用、京都では業者による回収(85%)、 家庭での回収(15%)による。菜種由来 廃食用油が中心			

分野	技術		日本	米国	欧州		
バイオディーゼル(化学変換による液体燃料生産) (北川、坂)	税による優遇措置		×	B100(100%BDF):非課税 BDF混合軽油:税の優遇措置なし (1970年改正の地方税法により課税)	バージン油からのBDF:軽油へのBDF 添加1%あたり1セント、最大20%まで非 課税(B20でガロンあたり20セント減 税) 廃食油からのBDF:バージン油の1/2	EU各国の独自の税優遇措置により BDFの減税政策が取られている オーストリアでは軽油95¢/リットルに 対しBDF90¢/リットルと、数%安価で ある	
	BDF合成反 応(エステ ル交換、エ ステル化)	均相触媒		現行製造プラントでは均相触媒が用いられている。しかし、新規な固体触媒の開発や、触媒なしで超臨界アルコールを用いる方法などの研究開発が盛んである。これらの新規合成法は、ベンチスケールのプラントでの実証試験の段階にあるものが多く、遊離脂肪酸含有量が20%を超える原料油の使用を可能とするなどの特徴を有する。		×	製造プラントでは均相触媒が用いられており、生成物中から触媒を分離回収後に固体肥料に変換する技術を確立している。様々な油脂類を原料とするためには、均相触媒を用いた合成法が最も適しており、新規合成法に関する研究開発よりも、原料によらず高品質なBDF製造を可能とする精製技術に関する研究開発が重要であるという見解である。
		固体触媒					
		超臨界アルコー					
均一塩基触媒法		(京都のみ) × (我が国全体)	京都市では高品位なBDF製造のための京都スタンダード(BDF品質規格)を設け、2段階塩基触媒法によるBDFの製造を行い、ゴミ収集車や市バスの燃料として年間150万リットルの利用に達している。しかし、その他の地方自治体ではBDFの品質規格がなく、高品位なBDFの利用が必ずしも実現していない。国による品質規格の策定が急がれる	米国では、ASTM D6751-03により品質規格を定め、高品位なBDFの製造を実現している。製造方法は塩基触媒法であり、遊離脂肪酸を含有(~25%)する廃油脂に対しては脂肪酸の酸触媒によるエステル化反応と、それに続くトリグリセリドの塩基触媒によるエステル交換反応の二段階反応法が実用化に向けて検討されている(カナダ、Biox社/トロント大学)	塩基触媒法では最も進んでいるが、BDF製造メーカーはそれぞれのノウハウを有し、決してその内容を開示しない。しかし、ほとんどがバージン油を対象としたもので、遊離脂肪酸含有の多い油脂には適用に限界がある。カナダにおける左記の酸触媒+塩基触媒の二段階反応法も用いられているはずである		
超臨界流体法			京都大学独自の超臨界メタノールによる方法で、以下の2つの方法がある。 1) 一段階超臨界メタノール(Saka法) エステル交換反応にもとづく方法 2) 二段階超臨界メタノール法(Saka-Dadan法) 亜臨界水による油脂の加水分解と超臨界メタノールによる脂肪酸のエステル化反応にもとづく方法 いずれの方法も世界的に認知された日本発の新技术でNEDO“バイオマスエネルギー高効率転換技術開発プロジェクト”として実用化研究が進められてきた				

分野	技術	日本	米国	欧州
バイオディーゼル(化学変換による液体燃料生産) (北川、坂)	リパーゼ酵素法	神戸大学(福田教授)、大阪市工研などで研究されている		オーストリア グラーツ大学(Mittelback教授)により研究がなされている
	不均一塩基触媒法	・均一塩基触媒法に比べ利点はあるが、触媒活性が低く、高濃度での油脂の反応に不向き、固体触媒の再利用に対する耐久性や高温での処理に課題がある。さらに油脂中の脂肪酸などによる固体触媒活性の阻害も問題である ・そこで、カチオン交換樹脂による遊離脂肪酸のエステル化、続いてアニオン交換樹脂によるエステル交換反応の二段階イオン交換樹脂法(東北大学、北川助教授)が提案されている。いずれの反応も完結する点に魅力があるが、大量生産に不向きである点や廃食油によるカラムの汚染に課題がある		固体触媒を用いたBDF製造プロセスのパイロットプラントが完成しており、EUのBDF品質規格を満足するものが得られている(IFP、フランス)
	BDF生産副成物利用	触媒が混入したグリセリンは分離精製コストが高いため、主に焼却処理されている。そのため、触媒分離が不要な合成法の開発やグリセリンの有効利用技術に関する研究が盛んに行われている。近年、粗グリセリンを不凍液や融雪剤として利用したいという要望もあり、この経路が確立すれば余剰グリセリン問題が解決される可能性がある。		プラント発注者の要望に応じて、粗グリセリン(純度80%)または医薬品用グリセリン(純度99%)を、固体肥料と共に販売している。遊離脂肪酸を回収して販売するプラントもある。
炭化技術 (横山)	炭化	木質系バイオマスの炭化(フラッシュカーボニゼーション)	フラッシュカーボニゼーションによる炭化(ハワイ大学)	
	炭化条件	東京大学、北見工業大学、京都大学、産総研などでは常圧が多い。温度は高め。	空気で加圧(10気圧)、温度400、1時間以下	
	炭化効率	同様の結果かやや低め	炭化収率は60%程度	
	装置	ラボスケール	デモプラント(直径85cm、高さ2.7m)	
	原料	木質系バイオマス、竹、リグニン等	木質系バイオマス、マカダミアナッツ、草本系バイオマス、シュレッターダスト、廃タイヤ	
	製品	木炭、機能性炭素、調湿剤、水質浄化剤	基本的には石炭代替資源、土壌改良材、製鉄用木炭	
	環境対策	X 特になし		触媒を用いたアフターバーナーによる環境対策

第 部 サイトレポート

以下に各パネルメンバーが執筆したサイトレポートを示す。一部の訪問先については、複数のパネルメンバーに執筆を依頼しており、一部内容が重複しているが、異なる観点から書かれている部分もあり、より詳細な比較が出来た。

掲載訪問先および執筆担当者は以下の通り(敬称略)。

米国

- Purdue 大学: 近藤
- Gas Technology Institute: 花岡
- National Renewable Energy Laboratory: 近藤、塚原、渡辺、花岡
- Community Power Corporation: 塚原
- Novozymes International : 渡辺、近藤
- Hawaii Natural Energy Institute 横山

欧州

- VTT (Technical Research Center of Finland) (生化学): 坂
- VTT (Technical Research Centre of Finland)(ガス化): 鈴木
- Institute for Agrobiotechnology (IFA-TULLN)
Department of Environmental Biotechnology: 鈴木
- Bio Diesel International (BDI): 北川
- Renewable Resources, Institute of Chemistry, University of Graz: 坂
- Institute of Chemical Engineering Gene Technology and Applied Biochemistry Laboratory, Vienna University of Technology (TUWien): 天野
- Institute of Structural Biology and Microbiology, CNRS (IBSM-CNRS) : 栗冠

1. 米国

1.1 Purdue University, Laboratory of Renewable Resource Engineering (LORRE)

<http://engineering.purdue.edu/LORRE>

近藤 昭彦(神戸大学)

DATE : Dec. 05, 2005

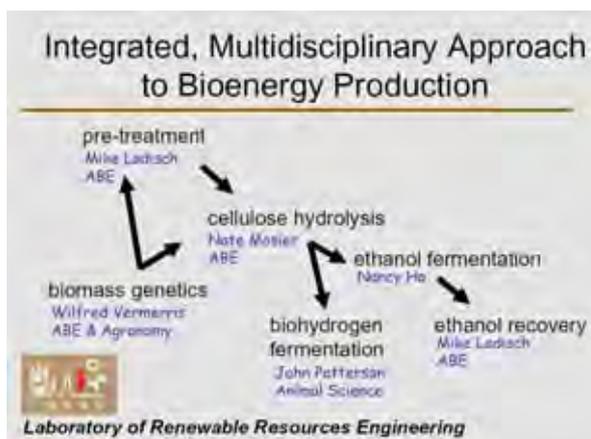
PLACE : Purdue University, Laboratory of Renewable Resources
Engineering (LORRE)
500 Central Drive
West Lafayette, IN 47907-2022

MEMBER: Michael R. Ladisch, Distinguished Professor and Director
Nancy W.Y. Ho, Senior Research Scientist
Miroslav Sedlak, Senior Research Scientist
Nathan S. Mosier, Assistant Professor

-Visitors (G-TeC): 神戸大学 近藤 昭彦
京都大学 渡辺 隆司
(独)産業技術総合研究所 花岡 寿明
(独)産業技術総合研究所 塚原 建一郎
JST/CRDS 横溝 修

1. 要旨

Purdue 大学の LORRE におけるバイオエネルギープロジェクトでは、コーンストーバー等のバイオマスからのエタノール生産を目指している。そのアプローチの特徴の一つとして、下図にあるように、前処理から酵母によるエタノール発酵、エタノール回収と、上流から下流にいたるプロセス全体について総合的な研究開発体制を引いていることが上げられる。大学としては合衆国でも珍しく、Purdue 大学の当該分野での強みであると言える。Purdue 大学においては、バイオエタノール生産効率を上げて、コスト低減を図るとともに、新しい技術開発を同時に進めている。



(資料提供 : LORRE)

図1 バイオマスプロジェクトの活動

2. 組織概要(歴史、背景、特徴、方針/戦略)

Purdue 大学の LORRE は、1978 年に、再生可能資源からの液体燃料生産を研究するために設立され、以来 25 年の歴史を持つ。その間に、研究領域は拡大し、Bioenergy、Bioprocessing、Bioproducts、Bionanotechnology、Biorecovery の 5 つの領域を含む広範なバイオプロセス工学の領域を統合的に研究している。LORRE は、酵母の分子生物学的な育種からバイオプロセス工学までを統合的に研究して

いる点が特徴と言える。この中で、G-Tech の目的であるバイオ燃料生産に関する研究組織を上図に示す。研究組織における Director は、Ladish 教授が勤めている。Ladish 教授は、特に前処理とエタノール回収に関する領域のリーダーを勤めている。また、Cellulose hydrolysis に関しては、Nathan S. Mosier 博士が、エタノール発酵用の酵母の分子育種に関しては Nancy Ho 博士がリーダーとして研究を進めている。これらの研究者が綿密に連携して研究開発を統合的に行うことで、差別化を図っている。

3. 主要な研究テーマ(目的、目標、レベル)

1) 前処理およびセルロース酵素分解に関する研究開発

Purdue 大学では、前処理と酵素糖化の最適な組み合わせについて精力的な研究を行っている。前処理については、下図左に示すように、熱水処理法の開発を行っている。熱水処理においては、特に、セルロース繊維の酵素による分解を促進できるところまで処理することを目指している。これは、単唐まで分解が進んだ場合、フルフラール等への過分解を起こしやすいため、前処理の間は、単糖への分解を最小限に抑えることが重要であるためである。このための熱水処理条件としては、150-220 程度であり、pH を 4-5 にコントロールすることが極めて重要であることを見出している。分解は、単糖形成を防ぐために、2-10 程度のオリゴ糖までに抑えることを目指している。

図 2 右に熱水による前処理を行った後の酵素分解を示すが、pH 制御熱水処理を行うことで、飛躍的に酵素分解を促進できることを明らかにしている。

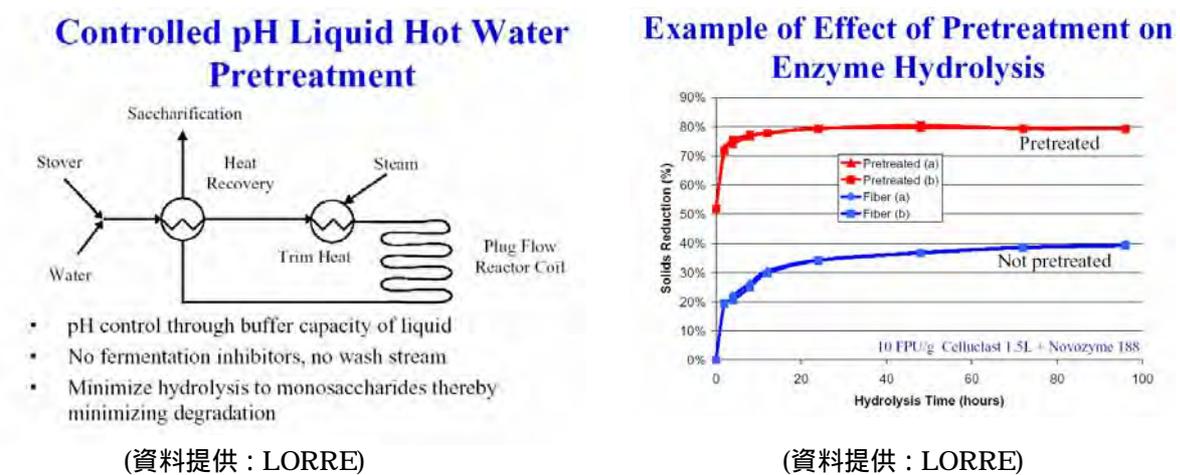


図 2 熱水処理後による酵素分解促進効果

2) 酵母の分子育種に関する研究開発

Nancy Ho 博士をリーダーとして、酵母の分子育種に関する研究が、1990年代後半から精力的に行われてきている。特に Ho 博士のグループのオリジナリティはキシロース発酵能力を酵母に付与した点である。右図に示す様に、キシロース発酵性を付与するには、酵素 Xylose isomerase (XI) を導入する手法と、Xylose reductase (XR)、Xylose dehydrogenase (XDH)、Xylulokinase (XK)

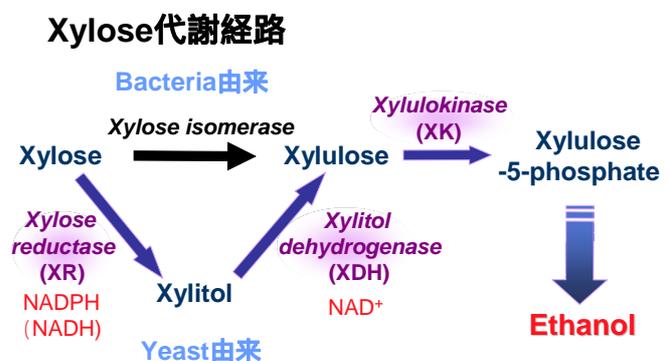
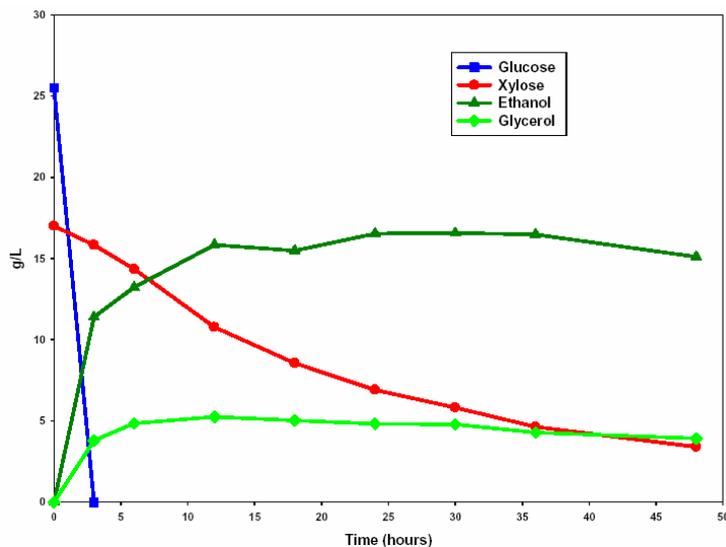


図 3 キシロース代謝経路

の三つの酵素群を導入する手法があるが、Ho博士は、後者のXR、XDH、XKを導入する手法の開拓者であり、基本特許をPurdue大学が保持している。この三つの酵素の中では、特にXKの活性が高いことが重要であるとのことである。これらの遺伝子を実用株でポリプロイドであるATCC株(アルコール発酵に利用されてきた)に導入し、キシロース発酵性酵母株424A(LNH-ST)および1400(LNH-ST)を育種することに成功している。この株による代表的な発酵例を右図に示すが、グルコースとの混合系においても、キシロースの発酵が行えていることがわかる。また、Ho博士のグループの酵母育種研究の歴史的な展開に関して説明を受けた。



Sedlak and Ho (2004), Appl. Biochem. Biotechnol. Vol.113-116, pp. 403-416

図4 グルコース/キシロース並行発酵

[1995-2002]

酵母へのキシロース発酵性の付与および酵母を用いたバイオエタノールおよび乳酸生産に関する研究。

[2000-現在]

酵母におけるキシロース発酵性の効率の更なる向上(マイクロアレーなどを用いての代謝解析とその育種へのフィードバック、トランスポーターの利用等)と、アラビノースなどのマイナーなペントースの発酵性付与に関する研究。

[2002-現在]

酵母においてアルコールと他の有用物質の同時生産によるプロセス経済性の向上に関する研究。

4.特徴的な点(方針、設備、その他)

特徴的な点としては、酵母の分子育種を徹底的に行うとともに、チームで研究を行い、前処理、酵素糖化、アルコール発酵を総合的に研究していることがあげられる。この点では、合衆国でも唯一の大学である。設備としても、前処理研究から微生物育種までを揃えている。

5.その他討議で分かったこと

- 1) Ho 博士によると、アルコール発酵では、やはり、タフな微生物である酵母が実用的であるとのことである。酵母は、前処理によって生じる発酵阻害産物の影響を最も受けにくい。また、安全性も大きなポイントである。バクテリアを利用した場合は、どうしても病原性バクテリアのコンタミが防げないが、酵母ではコンタミを防ぐ発酵条件を採用することが可能である。
- 2) 近年、カナダのバイオベンチャーlogen はアルコール発酵において、Ho 博士の開発した”Purdue Yeast (424A(LNH-ST))” を採用したとのことである。logen は各種の微生物系をテストしたが、酵母で

は操作が最も簡単であり、またスケールアップした際に、スモールスケールでの良いデータが再現できたためとのこと。logen が採用した 424A(LNH-ST)は、キシロース発酵に必要な三つの酵素遺伝子を導入した以外は、特別な育種は行っていないとのこと。また、logen から、今のところ 424A(LNH-ST)に対して特にリクエストはないとのこと。

- 3) 実用酵母への遺伝子組み込み手法の開発は極めて重要。
- 4) 統合的にプロセスを検討しているが、“バイオマス利用における現在のボトルネックは、バイオマスの糖化である”と考えているとのこと。

1.2 Gas Technology Institute

<http://www.gastechnology.org/>

花岡 寿明((独)産業技術総合研究所)

DATE : 9:00-12:00 6 December, 2005
PLACE : Gas Technology Institute (GTI)
1700 South Mount Prospect Road, Des Plaines, IL, 60018-1804
MEMBER: Mr. Francis S. Lau / Executive director, Gasification and Gas processing Center
-Visitors (G-TeC): 神戸大学 近藤 昭彦
京都大学 渡辺 隆司
(独)産業技術総合研究所 花岡 寿明
(独)産業技術総合研究所 塚原 建一郎
JST/CRDS 横溝 修

1. 要旨

ラボスケールの研究から、パイロットスケールの安定操業のための技術指導、さらに教育機関を兼ね備えた機関である。

世界各地でパイロットプラントの操業を行っており、バイオマスのガス化に関する研究は世界的レベルにあると考えられる。

ガス化に関するキーテクノロジーは、以下の3つと捉えている。

- ・流動床ガス化装置およびガス化炉内に膜分離装置を備えた水素生成装置
- ・乾式ガス精製システム(プラズマによるタール分解、Caをベースとした膜分離)
- ・エンドユース技術(エンジン、タービン、燃料電池、合成天然ガス、GTL、水素)

2. 組織概要

1941年に前身の研究所が設立され、天然ガス関連分野を研究主体として活動を行ってきた。2000年、GRI社とIGT社が合併し、現在の体制となった。独立・非営利研究所として活動。従業員260人(うち70%が科学者およびエンジニア)。天然ガスを中心としたエネルギー源(化石資源、バイオマス)について、受託研究、技術相談といった研究関連部門だけでなく、教育訓練部門も兼ね備える(図1)。その一部であるGasification & Gas Processing Centerでは、石炭およびバイオマスのガス化技術およびガス精製技術の開発を行っている。

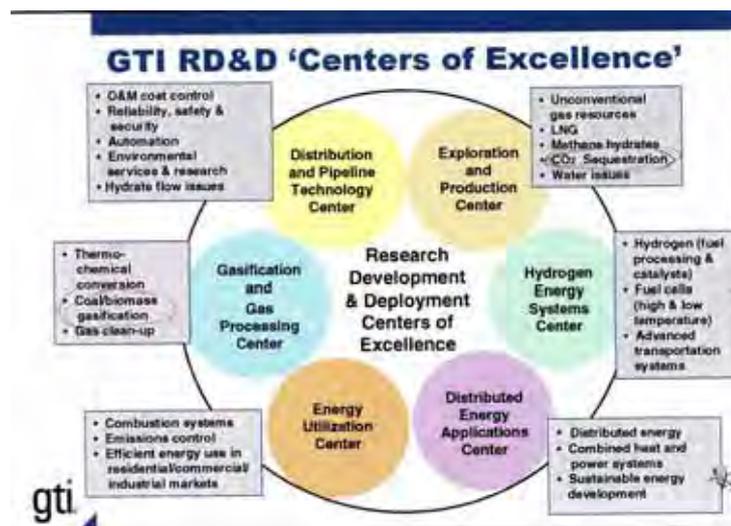


図1 GTI組織図(GTI提供)

3. 主要な研究テーマ

3.1 スケールアッププロジェクト

パイロットスケールでの共ガス化 80t/d (バイオマス 20 wt%, 石炭 80 wt%), Tempere、フィンランド

バガスガス化 100 t/d、ハワイ

U-GAS®プラント 1000 t/d、上海、中国

水素製造のためのバイオマスガス化 2 t/d, Minnesota

廃棄物バイオマス (chicken litter) ガス化 60 t/d, Georgia

バイオマスガス化(タールとオイルの Olivine を用いたガス化)、キエフ

バイオマスガス化-ガスエンジンプラント

110 t/d, 5.4 MWe, 11.5 MWth, Skive Project デンマーク

1.8 MWe, 3.3 MWth, Kokemaki, フィンランド

ガス化-ガス精製-ガスエンジン CHP プラント 12 t/d, 600 kWe, 1.8 MWth, カリフォルニア(建設中)

3.2 膜分離を利用した水素製造

ガス化炉中に水素分離膜を位置させ、炭素質物質(石炭、バイオマス)の酸素/水蒸気ガス化により生成した水素を in-situ で分離する(図2 下段)。ガス化炉系内で水素を除去するため、ルシャトリエの法則で、水性ガスシフト反応($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$)が進行することを利用して、また、水素を除去したガス化ガスは、精製され発電に使用される。

3.3 石炭ガス化

Indian Coal ガス化 100MWe, IGCC プロジェクト

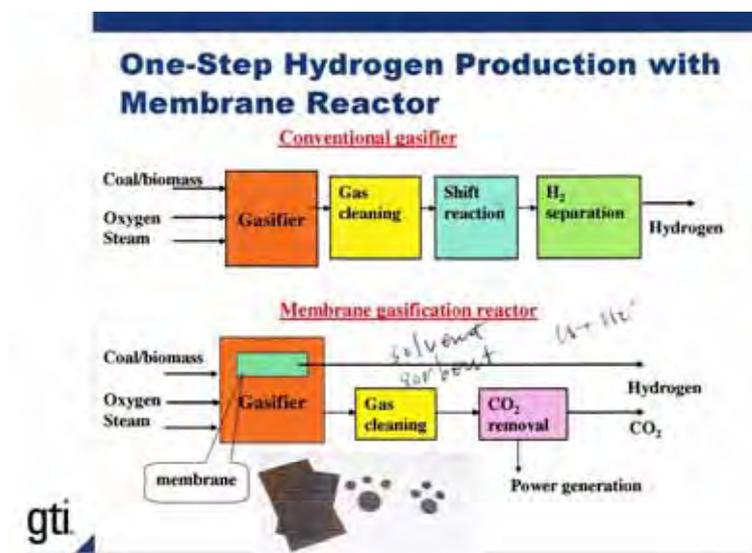


図2 ガス化炉内での膜分離を利用した水素製造スキーム

水素製造のための膜を用いたガス化

ボーイング社ロケット燃料のガス化

石炭ガス化-FT 合成

4. 特徴的な点

4.1 加圧流動床ガス化炉: Henry R. Linden Flex Fuel Test Facility (FFTF)

最新のガス化技術の開発および現在進行中のプロジェクトのサポートを目的とし、加圧流動床ガス化装置 FFTF を所有している。石炭、バイオマスを原料として運転実績あり。スペックとしては、

石炭 10-20t/d, バイオマス 20-40t/d

圧力 -400psig = 2.7 MPa, ガス化剤 空気/水蒸気

ダウンドラフト型合成ガス精製および分離システム

燃料電池、タービン、レシプロエンジン(往復機関)に接続可能

石炭から合成天然ガスへ転換可能

であり、合成ガスを經由した液体燃料製造、水素製造、CO₂回収技術開発に適用可能である。

4.2 ガス精製

ガス化ガスによりタービンを安定に運転するためには、ガス中の硫黄分を 20 ppmv 以下にする必要がある。さらに SOFC では、硫黄分 100 ppbv 以下のガスが必要とされる。

・プラズマによるタールクラッキング

投入エネルギーは少なくともタールが十分に分解できる可能性が高い。

・Ca ベースの膜分離(150-200) アリゾナ大、フロリダ大が注目している

H₂S, HCl, NH₃, CO₂, PM の分離、アルミナの基盤にいかにかクラックなしに支持させるかが課題。

4.3 ガス分析装置

ガスの精密な分析が必要。IMACC: FT-IR, SRS: Mass Spec, Agilent GC/MSD/FID/SCD, Varian: GC/PFPD を使用。

5. その他討議で分かったこと

LPG 代替としての DME にも関心が高い。ジョージアにあるマネジメント会社では、chicken litter をガス化原料として、加圧ガス化-ガスクリーニング-DME 合成のデモンストレーションプラントを計画中である。DME 合成には Haldor-Topsoe 社の固定床反応床を用いた技術を取り入れている。

GTI で行っているガス化の温度は 700-800 。CO と H₂ がターゲットであれば、平衡論的に高温が有利であるが、灰が溶融し、反応器内の閉塞およびスケールの生成を抑えるため。

ガス化圧力は、次に続く工程(ガスタービン、ガスエンジン)に依存し、昇圧工程は積極的には導入していない。

種々の原料(木質系、廃棄物系、草本系、石炭との共ガス化)の供給方法も検討している。原料種により内が閉塞しないように、ホッパーの形を変えている。灰分、水分が技術的にクリアすべきポイントである。

6. 類似の研究を行っている組織

- ・ VTT (Finland) 1100 で tar や NH₃ の分解
- ・ フラウンフォーファー(ドイツ) タールクラッキング
- ・ ナノエネルギー(ロンドン) プラズマによるタールの分解
- ・ 三菱重工 ガス化を經由する農産廃棄物からのメタノール製造
- ・ 産業技術総合研究所 ガス化を經由するバイオマスからの液体燃料(炭化水素、DME)製造

1.3 National Renewable Energy Laboratory (NREL) National Bioenergy Center

<http://www.nrel.gov/>

DATE : hh:mm-hh:mm Dec. 07, 2005

PLACE : National Renewable Energy Laboratory
1617 Cole Boulevard
Golden, Colorado 80401-3393
John Ashworth, Partnership Development Leader
James D. McMillan, Manager, Bioprocess R&D

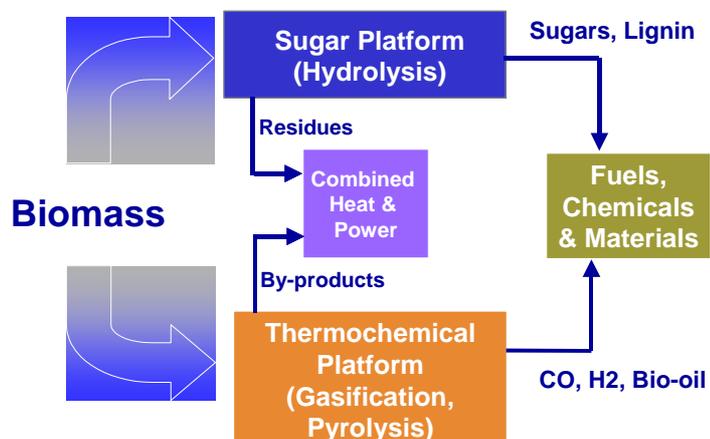
MEMBER: National Bioenergy Center
David C. Dayton, Senior Scientist I
Min Zhang, Senior Molecular Biologist
神戸大学 近藤 昭彦

-Visitors (G-TeC): 京都大学 渡辺 隆司
(独)産業技術総合研究所 花岡 寿明
(独)産業技術総合研究所 塚原 建一郎
JST/CRDS 横溝 修

NREL 報告(近藤 昭彦(神戸大学))

1. 要旨

NREL は現在、2025 年まで(次の 20 年で)に燃料や化学品生産の 1/3 について、バイオマスを利用した生産に切り替えることを目指して研究開発を行っている。NREL には、バイオマスの生物化学的変換を通してエタノールなどの液体燃料生産法を開発するグループと、熱化学的変換による発電や化学品生産などの技術開発を手掛けるグループがあり、相互に連携しながら統合的に研究開発を行っている。また、バイオマスのターゲットとしては、コーンストバー、スイッチグラス、ポプラを想定している(右図)。



(資料提供: NREL)

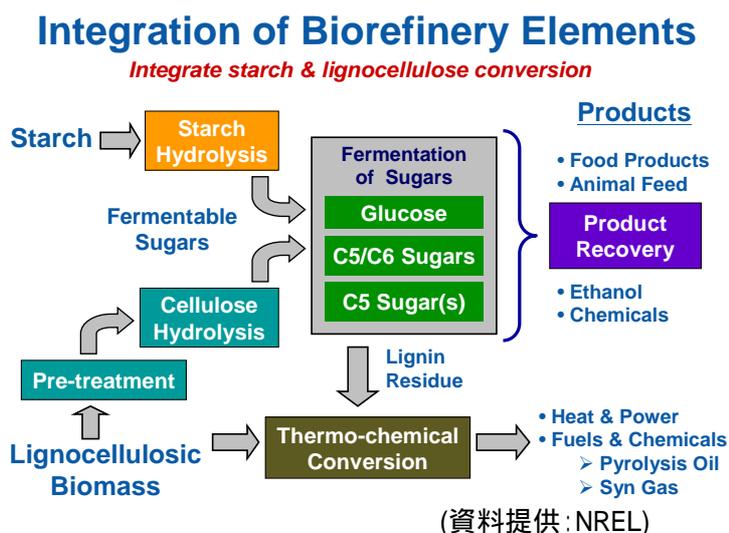
2.組織概要(歴史、背景、特徴、方針/戦略)

国立再生可能エネルギー研究所(NREL)は1977年に設立され、今年で25年の歴史を持つ。70年代の石油危機をきっかけとして循環型資源開発の機運が高まり、太陽光など再生可能エネルギー専門の研究機関としてスタートした。NREL が力を入れる分野の一つが、バイオマス(生物資源)エネルギーである。太陽光や風力を使ったエネルギー供給が天候要因で左右されるのに比べ、その安定性から有望視されている。クリントン前政権は99年に、2010年までに一次エネルギーの約10%、2050年には国内のエネルギーや化学品生産の半分をバイオマスでまかなうとする構想を打ち出した。ブッシュ政権になってからもバイオマスエネルギーを重視する政策に変化はなく、今年度の一般教書演説でも、2025年までに中東からの石油の75%以上をエタノールなどに代替する目標を掲げている。NRELのミッションは、バイオマスからのエタノールおよびバイオディーゼルなどの液体燃料生産に関する中核機関として研究を展開し、輸入石油量を減少させることにある。また、NRELのもう一つの大きなミッションは、バイオマスエネルギー関連の新しい産業の創出を行うことである。

3.主要な研究テーマ(目的、目標、レベル)

1) バイオマスの生物化学変換によるエタノール生産プロセス開発

NRELでは、例えばコーンを取り上げ、デンプンおよびリグノセルロース分の総合的な利用に関する研究開発を行っている(右図)。デンプンについては、酵素分解後、発酵によりエタノール生産等を行う。一方、コーンストーバー(リグノセルロース)については、まず希酸(希硫酸など)による前処理により主にヘミセルロースの分解を行う。その後酵素による糖化处理(発酵槽の一つを利用)を行い、得られる混合糖について、C5、C6糖発酵能を持った酵母により発酵を行う。また、リグニ



ン残渣は、蒸留塔で分離し(十分な水分があれば分離は問題ない)、熱化学的な変換(ガス化)により、熱や電力そして化学品などに変換される。一方リグニン分が多いバイオマス原料に関しては、直接に熱化学的な変換を行うことが有効な場合も多い。

プロセス全体のコストを下げるためには、既存のプロセスの拡張やパワープラントとの共存が有効である。また、付加価値の高い製品を同時に生産することも有効であり、こうした点も検討している。例えば Dupont 社(4年間のマッチングファンド)とエタノールと化学品、電力をコーンから生産する統合的なプロセス開発を行っている。

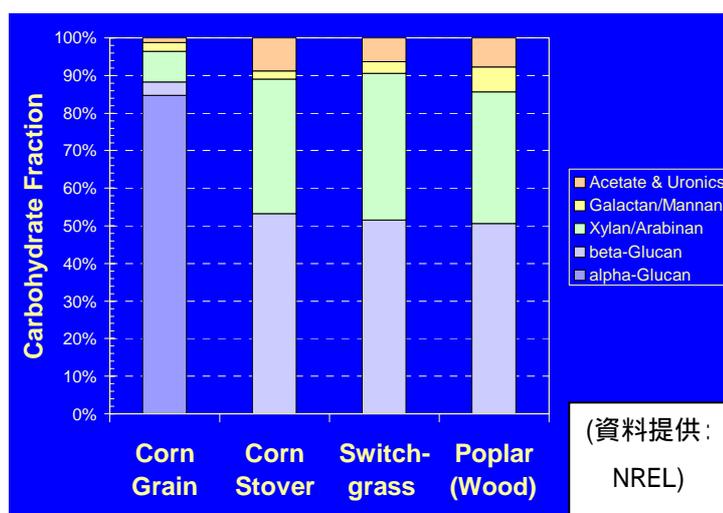
2) 前処理および酵素分解に関する研究開発

前処理に関しては、バイオマス濃度をいかに向上できるかが大きなポイントである。NRELでは、30%以上の濃度を狙っている。このためには、前処理と酵素糖化プロセスの組み合わせが極めて重要で

ある。前処理の条件が変動すると、酵素糖化の効率が大きく変動する。このため、NREL では、前処理と酵素処理の両面を統合的に研究開発している。糖化プロセスについては、酵素コストの低減が極めて重要な課題である。そこで、NREL は、Genencor 社およびNovozymes 社と共同で開発を進めてきている(4年間のプロジェクトで1年延長)。酵素としては、*T.reesei* の CBH1 と *A. celluloriticus* の EG1 を中心に検討している。これらの酵素の生産性の向上と、比活性の向上により、酵素コストの飛躍的低減に成功している。現時までに酵素コストを 1/20 程度(約 5 セント/ガロンーエタノール)まで低減することに成功している。

3) C5およびC6糖発酵性微生物の開発

コーンストーバー、スイッチグラス、ポプラなどでは、C5 糖の含有率が高いため(30-40%; 右図)、C6 糖とともに C5 糖を効率よく発酵できる微生物の開発が極めて重要である。NREL では、当初、エタノール発酵性に優れた微生物である *Z.mobilis* を用い、C5 糖発酵能の付与に成功した。しかしながら、現在は、微生物のプラットフォームを酵母に移して研究開発を進めている。これは、産業界からの要望によるとのことである。



NREL では、近年、Genomic ラボも立ち上げて、Omics ツールを積極的に活用して、よりロバストで効率の良いペントース発酵酵母を育種することを目指して研究開発を行っている。ペントースとしては、最も含有量の多いキシロースに加え、アラビノースも発酵可能な酵母の開発を行っている。

4) ガス化プロセスの開発

ガス化プロセスについては、特に soft wood のようにリグニン分の多いバイオマスに関しては、生物学的変換より有効であると期待されている。また、生物学的な処理による発酵残渣中にはリグニンが多いため、ガス化を行って得られる合成ガスから化学的な変換によって、エタノールや DME(天然ガスの代替として)等に変換することで、プロセス全体としての収率を向上させることを目指している。このような観点から、生物学的な変換と補完しあう形で研究開発が進められている。すなわちインテグレーションによるエタノールや化学品生産効率の最大化を目指している。このガス化におけるポイントは、合成ガスをクリーンにする(S等の含有率を減少させる)か、汚れに強い触媒を作ることであり、こうした点についての一連の研究開発が行われている。NREL では、クリーン化のアプローチのほうが可能性が高いと考えているとのこと。

4.特徴的な点(方針、設備、その他)

NREL では、生産コストの低減によるプロセスの実用化を明確に打ち出しているため、評価項目としてコストに関する強い意識を持って研究開発が進められている。また、基盤研究開発のみならず、独自の大規模なバイオリファイナリーパイロットプラントを完備しており(右図)、スケールアップを含めた研究開発を行える点が強みである。また、バイオマス利用に関する、多様な研究者が集結しており統合的な開発が行われている。



(NREL パイロットプラント模型)

NREL の設備は産業の育成を図る上で、パートナー企業も研究開発において利用可能である。実際、広範なパートナー企業に利用されており、産業育成に有効に機能しているとのこと。

その他討議で分かったこと

- 1) 現在合衆国においては、約 80 のエタノールプラントが稼動中であり、20 のプラントが建設中であり、生産能力は 1600 万 kL/年程度に増加している。
- 2) 現在のバイオエタノールの生産コストの目標は、20-30 円/リットルである。
- 3) 植物原料側の研究開発も重要であるが、(例えば、20-30%デンプン量が多いコーンや、成長が早くリグニンが少ない植物の育種など)、この点は DOA が担当しているとのこと。
- 4) バイオディーゼル燃料に関しては、生産は比較的容易であるが、グリセロールの供給過剰が起こる点が問題である。
- 5) NREL では水素に関する研究は行っていない。液体燃料に特化している。
- 6) バイオマスの収集は大きな問題である。コーン生産農家では、"5\$ by touch"と言われており、機械化や乾燥などがコスト削減においては大きな問題である。
- 7) エタノール発酵における実用培地としては、糖化液にコーンステープリカーと硫酸を加えたものを使用している。

5.類似の研究を行っている日本の組織、個人(状況、レベル比較)

1)アルコール発酵酵母の育種

アルコール発酵微生物の育種において国内の代表的な研究チームとしては、コリネバクテリウムを用いて増殖非依存型のアルコール発酵プロセスを開発している RITE の湯川博士のグループが上げられる。また、細胞表層工学を用活用してキシロースに加えてセルロースやオリゴ糖発酵性を持つ酵母の育種に関しては、神戸大学工学部の近藤教授と京都大学大学院農学研究科の植田教授のグループがある。また、キシロースやオリゴ糖発酵性を付与した *Zymomonas mobilis*, *Zymobacta rplamae* の開発については、鳥取大学工学部の築瀬教授のグループが精力的な検討を行っている。また、東京大学大学院の五十嵐教授のグループは、異なわらなどから直接アルコール発酵可能な微生物に関する研究を行っている。こうした研究における日本のレベルは、合衆国と比較しても高いレベルにあると言える。また、酵母の育種に関しては、月桂冠や白鶴をはじめとする日本の醸造発酵企業も、高いレベルの技術力を保持している。

2) バイオマスからのエタノール発酵技術に関する工業的な検討

工業化を試みている代表的な企業研究グループを以下に示す。

日揮： 米国アルケノール社から濃硫酸糖化法のライセンスを受け、酵素の分子育種や微生物育種(酵母および *Z.mobilis*, *Z. plamae*)を行う大学チームと共同で実証研究を行っている。

月島機械： 米国 BC International 社からのライセンスを受け、希硫酸処理(140, 200)と遺伝子組み換え大腸菌を用いたエタノール発酵プロセスの実証研究を行っている。

日本食糧： 微粉化とオゾン酸化法による前処理と酵素法を組み合わせることで糖化を行い、自社開発微生物による C5, C6 糖発酵を行う技術を開発している。

三井造船： 希酸によるヘミセルロース分解、酵素糖化、遺伝子組換え酵母(C5,C6 糖発酵:VTT よりライセンス)、膜脱水プロセスを組み合わせたプロセスの実証研究を行っている。

バイオエナジー： 独自開発のアーミング酵母を活用した発酵プロセスの実証研究を行っている。

以上のように、独自研究開発の路線をとる企業と海外からの技術導入を図って開発を急ぐ企業がある。

NREL 報告(塚原 建一郎((独)産業技術総合研究所))

1. 要旨

ガソリンと競争力のあるコストで燃料エタノールを製造するため、エネルギー変換効率や生産性の向上と同時に経済性の面からも有利となるように、バイオリファイナリーのコンセプトに基づいて、発酵可能な部分に関しては糖化-エタノール発酵、発酵に適さない部分に関してはガス化経由エタノール合成というプロセスを開発している。

セルロース系バイオマスからのエタノール生産技術を実用化することを大きな目標としており、その点で、\$ 0.20/gal-EtOH にまでセルラーゼのコストを低下させることができたことは、2010 年におけるエタノール生産コストの目標値である \$ 1.07/gal の達成に向けて、大きな前進であると考えられる。

バイオマスのエネルギー変換技術について、熱化学的変換・生物化学的変換ともに研究水準は世界最高レベルにあると考えられる。

2. 組織概要(歴史、背景、特徴、方針/戦略)

本研究所は 1974 年に太陽エネルギー研究所として設立され、1991 年に米国エネルギー省の研究所となり国立再生可能エネルギー研究所と名称を変更した。総勢約 1200 名のスタッフにより、バイオマス、太陽電池、風力、燃料電池、地熱などの再生可能エネルギー変換技術の開発および効率改善全般にわたって研究開発を実施している世界的な拠点である。総予算は 2004 年度で 2119 億ドルである。米国内の企業や大学との産官学連携を積極的に企画実施し、中心的役割を果たしている。

バイオマスエネルギーに関しては、2000 年に NREL 内に設立された National Bioenergy Center (NBC)において、研究が推進されている。NBC の組織は、図1に示すように、NREL を含む5つの国立研究所で構成されたコンソーシアムである。ミッションは、石油依存・温暖化の抑制、バイオエネルギー産業の育成という DOE の目標を達成するための研究開発である。NBC においては、バイオマスを原料として、6 つの中心となるプラットフォーム(Sugar-Lignin プラットフォーム、Syngas プラットフォーム、Bio-oil プラットフォーム、Biogas プラットフォーム、Carbon-Rich Chains プラットフォーム、Plant

Products プラットフォーム)の技術開発が行われている。

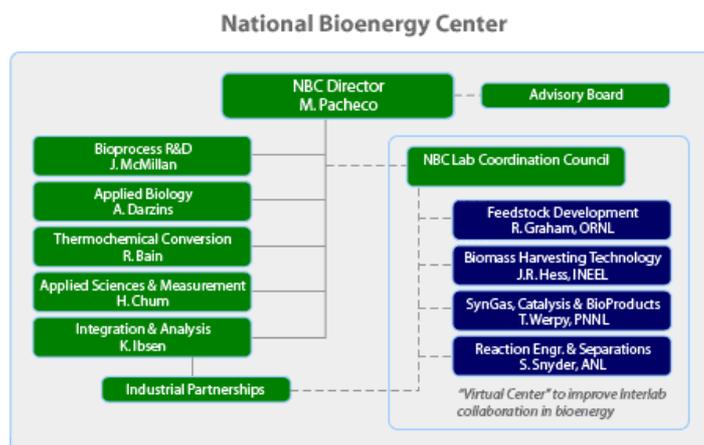


図 1 National Bioenergy Center (NREL ホームページ)

これらプラットフォームを基盤として、多種多様な燃料や有用物質を体系的に生産するために、「バイオリファイナリー」の概念(図 2)に基づいて研究開発が進められており、バイオマスのすべてを利用し廃棄物を出さないことを目指している。

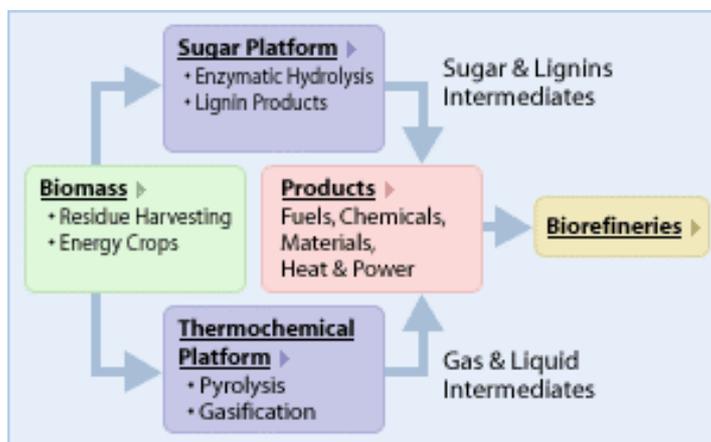


図 2 Biorefinery Concept (NREL ホームページ)

バイオマスからのエタノール製造においては、生物化学的変換ルートである Sugar プラットフォームと熱化学的変換ルートである Syngas プラットフォームから構成される。

3. 主要な研究テーマ

エネルギー省・農務省などは生産量の増大とコストダウンを目的に、農産廃棄物のセルロース系バイオマスの利用技術に関する研究支援をしている。NREL においてもセルロース系バイオマスからのエタノール生産技術を実用化することを大きな目標としており、現在(2003 年)、\$ 2.67/gal であるエタノール生産コストを、2010 年には \$ 1.07/gal にまで低減させることを目標としている。年間 10 億トン以上利用できるリグノセルロース系バイオマスからのエタノール生産が工業的に実現できれば、ガソ

リンの 50～70%を代替することが可能になる。Alternative Fuels User Facility の中にバイオマス燃料製造技術を評価するための発酵・蒸留パイロットプラント(The Bioethanol Pilot Plant s one-ton-per-day Process Development Unit)を有しており、多くの共同研究を行っている(表 1)。

表 1 Process Development Unit での共同研究 (NREL 配付資料)

Industrial Partner	Feedstock	Product	Key Processes	Organism	Scale	Business Mechanism
Amoco	corn fiber	ethanol, animal feed	pretreatment systems (2), glucose/xylose cofermentation	yeast (including recombinant)	PDU (9000 liter)	CRADA
BC International	bagasse, rice straw, wood	ethanol	pretreatment, fermentation	recombinant <i>E. coli</i> bacteria	20-L, 160-L	CRADA
Arkenol	rice straw	ethanol	glucose/xylose cofermentation	recombinant <i>Zymomonas</i> bacteria**	160-L	CRADA
Sustainable Technology Energy Partnership*	mix of a variety of solid wastes	ethanol	dilute acid and enzymatic hydrolysis with enzyme recycle	yeast	4-L steam gun, 30-L fermenter	collaboration
Sealaska Corp.	softwood	ethanol	hydrolysis, fermentation	Nx7 yeast**	4-L steam gun, bench scale	memorandum of understanding
Quincy Library Group	softwood forest thinnings	ethanol	hydrolysis, fermentation	Nx7 yeast**	4-L steam gun, bench scale	collaboration
Collins Pine, California Energy Commission	softwood	ethanol	hydrolysis	none	4-L steam gun	collaboration and subcontract
Swan Biomass	rice straw	ethanol	pretreatment, glucose/xylose fermentation	recombinant <i>Saccharomyces</i> yeast	PDU pretreatment, bench-scale fermentation	collaboration

4. 特徴的な点

図 2 のバイオリファイナリーコンセプトに示されるように、エタノール生産コストの目標値である \$ 1.07/gal の達成に向けて、前処理プロセスの改良、セルラーゼ酵素コスト低減および活性強化、ペントース発酵微生物の育種改良、リグニン由来燃料の開発などが進められている。

前処理については、希硫酸法に絞っているわけではなく、濃硫酸法、アンモニア爆砕法、蒸気爆砕法、加圧熱水法など他の可能性も検討している。

セルラーゼのコストに関しては、Genencor, Novozyme 両社などとの研究により、セルラーゼのコストが約 1/10～1/20 に下がった(\$ 0.20/gal-EtOH)とのことである。NREL では、セルラーゼの活性増強とコスト低下により酵素糖化を工業化可能とすることを目指しており、2010 年におけるエタノール生産コストの目標値である \$ 1.07/gal の達成、さらには、技術確立・工業化に向けての大きな前進であると考えられる。

原料となるコーンストーパー(茎や葉など)では、ヘミセルロースを構成する C5 糖が乾燥重量で 20～25%含まれているが、酵母よりも優れた発酵速度を示す細菌である *Zymomonas* に、大腸菌由来のキシロース代謝系遺伝子を導入することによりキシロースからの理論収率の 8 割以上のエタノール生産を報告している。

5. その他討議で分かったこと

酵母や *Zymomonas* など発酵菌の育種については、DuPont など多くの共同研究を実施中。これまで、*Zymomonas* を中心に微生物育種を行ってきたが、酵母の可能性も今後は考えている。

熱化学変換変換ルート(Syngas プラットフォーム)でガス化経由エタノール合成を行うことにより、

Sugar プラットフォームとともに Biorefinery を推進するため、GTL の目的製品としてエタノールをターゲットにしているが、他のルート(FT 合成、DME 製造、MeOH 製造)を選択する可能性も今後はあり得る。

Alternative Fuels User Facility の発酵・蒸留パイロットプラント(図 3)において、技術評価を行い、工業化に向けたデータを取得している。

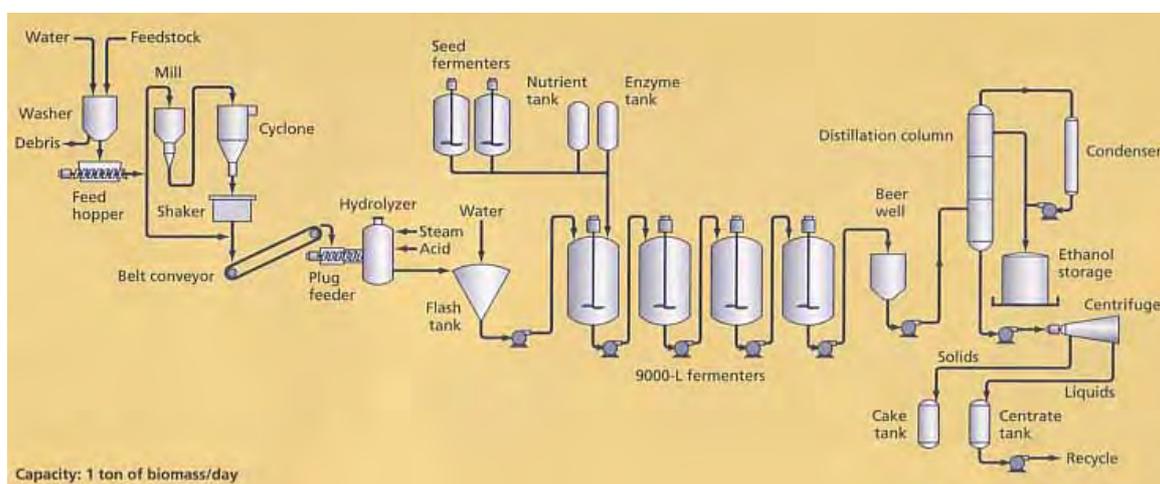
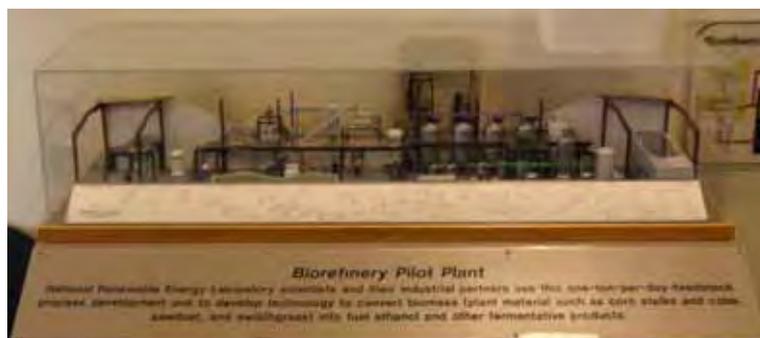


図 3 The Bioethanol Pilot Plant s one-ton-per-day Process Development Unit の模型(上段)およびフロー図(下段、NREL 配付資料)。

6. 類似の研究を行っている日本の組織

米国で開発されたペントース発酵性の組換え *Zymomonas* (NREL) や *E. coli* (フロリダ大) は特許の問題があることから、日本独自のエタノール発酵菌の育種が強く望まれている。

そのため、微生物育種に関する研究は日本においても盛んに行われており、エタノール生産酵母へのストレス耐性付与(熊本大学)、コリネ型細菌を利用したエタノール製造(RITE)、細胞表層工学技術により糖化酵素を細胞表面にディスプレイした酵母を利用したエタノール生産(神戸大学・京都大学)、*Zymomonas* や *Zymobacter* へのペントース発酵性の付与(鳥取大学)などがある。最後の2例の発酵菌については、NEDO 出水アルコール工場内に設置されたパイロットプラント規模でのセルロース系バイオマスからの無水エタノール生産プロセスにおいて、性能評価が行われている。

また、前処理・糖化に関しては、水熱処理(産業技術総合研究所・東北大学・広島大学など)やメカノケミカル処理(産業技術総合研究所)と酵素糖化を組み合わせた処理方法の研究がある。

NREL 報告(渡辺 隆司(京都大学))

1. 概要

米国エネルギー省は、下記の5つの研究機関を統括したコンソーシアム組織、国立バイオエネルギーセンター(National Bioenergy Center)を設置し、バイオマスの、燃料、化学品、材料、エネルギーへの変換プロセスの先進的な研究、産業化のための支援研究を実施している。国立バイオエネルギーセンターのヘッドオフィスは、NREL に設置されている。

- Argonne National Laboratory
- Idaho National Laboratory
- National Renewable Energy Laboratory (NREL)
- Oak Ridge National Laboratory
- Pacific Northwest National Laboratory.

国立バイオエネルギーセンターのミッションは、以下の3点である。

1. 石油の使用量削減
2. 米国のバイオインダストリーの創成
3. 地球温暖化の防止

このうち、1.の石油の使用量削減に関しては、2025年までに、米国における原油の輸入量を1/3にすることを目標としている。

国立バイオエネルギーセンターでは、バイオマスに関する様々な研究を実施している。主な研究を列記する。

- 5単糖と6単糖を同時発酵できる微生物のメタボリックエンジニアリング。産業界からの要請により、今後は細菌類ではなく酵母の育種を重点的に開発(NREL内に遺伝子工学ラボラトリーを設置)
- 分子ビーム質量分析器(MBMS)、FTIR、LC-MS、NIR、などによるバイオマス変換プロセスのための迅速成分定量、分析系の開発
- SEM、TEM、原子間力顕微鏡などによるバイオマスの表面分析
- セルロース、ヘミセルロース、リグニンへの分離システムの開発
- Syn gas 生産のための小規模モジュラー型および実用化スケールのガス精製システムの開発
- 生体触媒、化学触媒のスクリーニング
- 技術経済分析、LCA 分析
- 検索可能なバイオマス資源のデータベースの作成と提供
- エタノール生産パイロットプラント、メンブランセパレーター、バイオリクター、熱触媒リアクター、ガス化パイロットプラント等による実用化研究

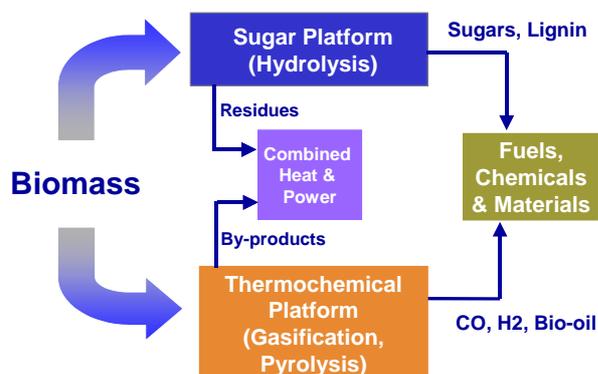


図1 NRELのバイオマス変換プラットフォーム
(資料提供: NREL)

- 穀物とコーンストーバーなどの残滓の同時収穫システムの開発、エネルギー作物の収穫システムの開発

米国再生エネルギー研究所(NREL)は、バイオマス変換研究のコア研究機関であり、コーンストーバーからのエタノール生産をはじめとする実用化に直結したバイオマス変換研究を実施している。コスト削減のシナリオを基にした現実性の高い研究に特化しているが、コスト削減に必要なアルコール発酵性微生物の分子育種など基礎研究も実施している。但し、新規前処理法の開発に関しては、大学など他の研究機関の委託研究が中心である。新規前処理法開発の一部は、2000年以降 Biomass Refining Consortium for Applied Fundamentals and Innovation (CAFI)を通して、実施している。この背景としては、米国のバイオマスがコーンストーバーなどのソフトバイオマスが中心であり、希硫酸前処理がコストの面で有利と判断されているためである。

NREL のバイオマス変換は、

1. 糖をプラットフォームとした変換プロセス
2. 熱化学的変換プロセス(ガス化)

の2つの変換プロセスのコンビネーションを基本とし、糖の発酵残滓であるリグニンをガス化により Syn gas に変換し、再資源化するところに特徴がある。Syn gas は、触媒反応により混合アルコールに変換される。



図3 NREL のバイオエタノールプラント
(http://www.eere.energy.gov/biomass/sugar_platform.html)

2. 米国でのバイオマス資源

西暦2003年の米国での再生可能資源の一次エネルギー供給比率は6%であり、再生可能資源の中で、バイオマスが46%を占める。米国のバイオマスとしては、コーンストーバーの他、スイッチグラス、ポプラ、パルプ化用として植林されたものの、未利用なマツモアトランタにある。

これらの中で、スイッチグラスは、生長量が速いことから、バイオマス資源として有望視されている。スイッチグラスは、家畜飼料としては使用されない。

トウモロコシは、米国で消費されるガソリンの10-20%しか供給できない。これに対して、米国のリグノセルロースは10億トン/年の供給量があり、ガソリンの50-70%を代替できる量に匹敵する。従って、今後の研究開発の重点としては、リグノセルロースから如何に低コストでエタノール、化学品を生産できるかである。

1 billion tons/year of lignocellulosic

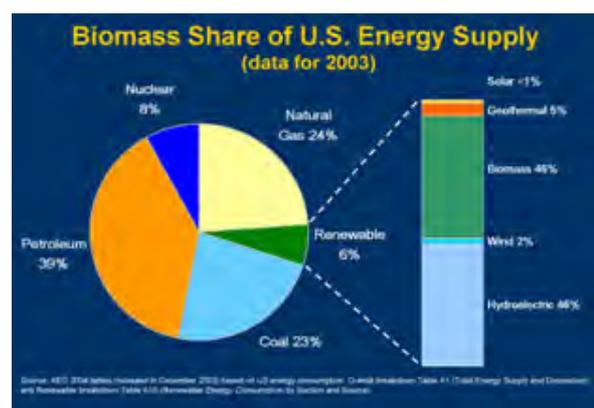


図2 米国のエネルギー供給
(資料提供: NREL)

3. バイオマスからのエタノール生産

NREL では、コーンストーバーからのエタノール生産を精力的に研究し、パイロットプラント(PDU: The

Process Development Unit)を操業している。その基本プロセスは、希硫酸前処理によりヘミセルロースを加水分解し、残渣として分離されたセルロース・リグニン成分をセルラーゼと遺伝子組換え酵母でエタノールに変換する。リグニンは、エタノール発酵残滓として回収する。NREL のパイロットプラント(PDU)では、パートナーして Amco, BC International, Arkenol, Selaska Corp, Swan Biomass, Collins Pine-California Energy Comission, Suitable Technology Energy Partnership などが参加し、コーンストーバー、バガス、イナワラ、針葉樹などからのエタノール生産研究を実施している。

NREL のエタノール生産コストの試算では、2010 年までに、2000 年ベースのコストを 1/3 までに下げること目標としている。

2000 年 \$3.48/galon

2003 年 \$2.67/galon

2010 年 \$1.07/galon

このコスト削減には、前処理、糖化・発酵工程の改良とともに、コーンストーバーを土に触れない状態で回収するための機械の開発が必要であり、2010 年の原料コストは、2000 年の約半分になると試算している。

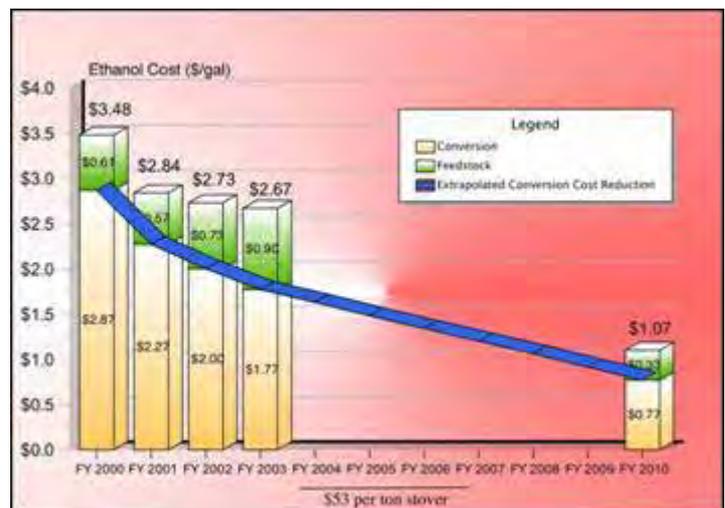


図 4 米国におけるエタノールのコスト試算
(資料提供： NREL)

4. バイオマスからの有用ケミカルスの生産

国立バイオエネルギーセンターでは、民間企業とも連携し、バイオマスからの化学品生産の研究開発をしている。Dupont 社は、米国エネルギー省と総額 3800 万ドルの研究契約を結び、石油から生産していたポリエステル原料 1,3-プロパンジオールをコーンを原料とする発酵法に変換した。これは、すでにソロナという商品名で合成繊維に使用されている。石油から発酵法に転換した主な理由は、発酵法の方がコストが安いからである。

また、国立バイオエネルギーセンターでは、製紙工場から排出される黒液中のリグニンをガス化して Syn gas を生産し、これからアルコールなどの有用ケミカルスを生産する研究を実施している。米国の製紙工場のクラフトパルプ化設備のボイラーは、老朽化しており効率が悪い。これを最新鋭のガス化プラントに置き換えることにより、エネルギー利用率の向上と有用ケミカルスの生産が可能になる。また、パルプ廃液からヘミセルロースを抽出し、これを発酵法によりエタノールなどに変換する。このように、米国エネルギー省では、製紙工場の設備更新とリンクして、バイオマスからエネルギー、有用化学品を生産する戦略をもっており、国立バイオエネルギーセンターはその研究開発の核となっている。

参考ホームページ

- DOE Biomass Program Web Site

<http://www.eere.energy.gov/biomass/>

- NREL Biomass Web Site

<http://www.nrel.gov/biomass/>

- Biomass Research and Development Initiative

<http://www.bioproducts-bioenergy.gov/>

NREL 報告(花岡 寿明((独)産業技術総合研究所))

1. 要旨

生物学的変換および熱化学的変換技術に関して討議を行ったが、ここでは熱化学的変換技術を中心に報告する。

徹底的に市場調査をした上で、経済性、生産性およびエネルギー効率が高いプロセスを想定し、その構築に必要なキーテクノロジーを抽出し、研究資源を集約している。

ガス化を経由するバイオマスからのエタノール製造において、キーテクノロジーは触媒を用いたタームクラッキングと位置づけている。

バイオマスの熱化学的変換の観点からは、研究水準は世界レベルにあると考えられる。

2. 組織概要(歴史、背景、特徴、方針/戦略)

再生可能エネルギーを効率的に変換する技術を構築することを目的とした公的研究所。1974 年設立。NREL としては、1977 年に太陽エネルギー研究所としてスタートした。1991 年 9 月米国エネルギー省の研究所となった(現在の組織は <http://www.nrel.gov/orgchart.html> 参照)。

バイオマスエネルギーについては、National Bioenergy Center の中心機関として、バイオリファイナリー(一つの工場内で、バイオマスからの電力、熱、化学製品および燃料を生産する)の開発を推進している(図 1)。このコンセプトは、各変換技術で、共通の中間体を経由する概念を持つ。生物学的変換技術はシュガーを経由するシュガープラットフォーム、熱化学的変換技術は合成ガスを経由する syngas プラットフォームを特徴としている。

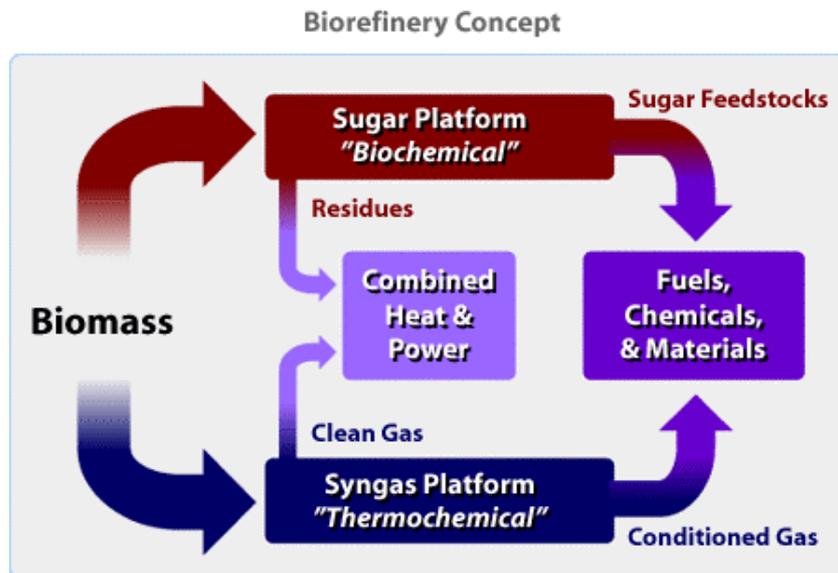


図 3 バイオリファイナリーコンセプト

3. 主要な研究テーマ

NREL で開発しているバイオリファイナリーの目的生成物の一つは、エタノールである。製品であるエタノールのコストは、最終的には\$1.07/gallon を目標としている。

熱化学的変換ルートでは、バイオマス(コーンストーバー)および生物学的変換過程での発酵残渣の高温ガス化により合成ガス(CO + H₂)を経由し、触媒反応によるエタノール合成を考えている。

上記目的のマイルストーンとして、2010年までにバイオリファイナリー初号機の立ち上げ、2010-2015年にNi触媒を用いたタールクラッキング(ガス精製)技術、それに続き、2015-2020年にBTL技術の実用化を目標としている。

合成ガスからエタノール製造工程において、MoS₂触媒の開発に焦点を置いているが、現段階ではチャレンジングな目標と考えられる。

4. 特徴的な点

バイオマスからのエタノール(ケミカルアルコール)製造には、生物学的変換および熱化学的変換技術を用い、スタンドアロンプラントを念頭に置いている。基本的には、バイオマスガス化-ガス精製-エタノール合成に分けられ、具体的には以下のような組み合わせを考えている。

・ ガス化

ガス化原料として、発酵残渣および農産廃棄物(コーンストーバー)を考えている
ガス化原料を連続的に供給する方法が重要。

air/steam ガス化

・ ガス精製

流動床、触媒を用いたタールクラッキング

触媒のリサイクル

スクラバーシステム

プロセス中で排出されるCO₂はタールリフォーミング(ドライリフォーミング)に使用する

・ エタノール(液体燃料)合成

MoS₂触媒によりエタノールを中心として、プロパノール、ブタノールなどのケミカルアルコールを合成

上記プロセスの構築に向け、ガス化およびガス精製に関して基礎的な実験を行っている。バイオマス(コーンストーバー)の水蒸気ガス化により、タールの排出挙動を調べている。649、steam/biomass = 0.5の条件で、タールの主成分はベンゼン 6500 mg/Nm³、フェノール 1000 mg/Nm³であることを見出している。また、窒素や硫黄といったヘテロ原子を含んだ化合物の挙動も重要であるとしている。技術的な問題として繊維状のコーンストーバーの供給方法を挙げている。

また、ガス精製に関しては、Ni触媒を用いたタールクラッキング試験を行っており、incipient wetness法を用いて調製したNi触媒に関し、825、875でのタール分解挙動を調べている。Ni粒子はNiおよびNiOが混在しており、反応中にNiOの還元(NiO+H₂→Ni+H₂O)およびタールの1種であるベンゼンが触媒上にコーキングし、反応性に経時変化が認められる。特にベンゼンのコーキングは触媒失活の主要原因であることを突き止めている。

5. その他討議で分かったこと

バイオマス中の含水率が重要な問題。原料であるコーンストーバーを収集する機械の開発も重要。

現在、エネルギー作物は利用されていないが、スイッチグラス、ポプラが有望。特にスイッチグラスは、成長速度が速い、大きな根、収量が高い、タフ、土壌を守るという点から、最も有望視している。

現在、プロセスの安定操業に対するボトルネックは操業コストと捉えている。

製品として、エタノールをターゲットにしているが、炭化水素燃料、DME も選択できる。どれを製品とするかは政策次第。

ネブラスカ州ではバイオマス資源が豊富に存在する。以前、製紙工業が盛んであったため、製紙原料として pine を植えたが、インドネシアやブラジルに工場が移転したため工業が破綻したという背景がある。

6. 類似の研究を行っている日本の組織

バイオマスガス化触媒として、筑波大学・富重先生が検討されている Rh/SiO₂/CeO₂ 触媒がユニーク。流動床ガス化のベッドに上記触媒を入れ、550 という低温でバイオマス部分酸化ガス化を行い、タール成分がほとんど認められていない。高価な Rh を使用しているが、Ni 触媒よりもタール分解能(水素生成能でも比較している)が高く、低ランニングコスト化が実現できれば革新的なタール分解技術と成り得る。

ガス化を経由するバイオマスからの液体燃料製造については、三菱重工および産業技術総合研究所が検討を行っている。前者はガス化を経由するバイオマスからのメタノール合成プロセスにおいて、実証段階にある。また、後者はラボスケールにおいて、ガス化を経由するバイオマスから DME 合成の実績があり、2005 年 10 月からはバイオマス研究センターを設立し、軽油を中心とした炭化水素燃料の製造プロセスの構築に着手している。

合成ガスを用いた液体燃料製造に関しては、富山大学がバブルカラムリアクターを用いたベンチスケールでの炭化水素燃料製造(数 L/d 規模)の実績がある。

1.4 Community Power Corporation (CPC)

<http://www.gocpc.com/>

塚原 建一郎((独)産業技術総合研究所)

DATE : 14:00-15:00 Dec. 7, 2005
Community Power Corporation
PLACE : 8110 Shaffer Parkway
Littleton, Colorado USA 80127
Robb R. Walt / President & CEO
MEMBER: Kingsbury Browne / Vice President
James P. Diebold, P.E. / Principal Chemical Engineer
神戸大学 近藤 昭彦
-Visitors (G-TeC): 京都大学 渡辺 隆司
(独)産業技術総合研究所 花岡 寿明
(独)産業技術総合研究所 塚原 建一郎
JST/CRDS 横溝 修

要旨

小型の自動バイオマス発電システムの商品化に成功した機関である。木質系バイオマス資源および可燃性廃棄物を原料として、タールをほとんど生成しないでオートマチックにガス化を行う技術を開発した。また、商品化にあたっては、徹底的に市場調査をした上でプロセス設計を行っている。小型バイオマス発電システムについて、研究開発の水準は世界最高レベルにあると考えられる。

組織概要(歴史、背景、特徴、方針/戦略)

本研究所は1995年にRobb WaltとArt Lilleyによって設立された。現在の場所(図1)に、2005年になってから移転した。研究者・エンジニア・テクニカルスタッフなど総勢約20名で構成されている。



図1 Community Power Corporation

環境負荷が少なく自動化された、小型ガス化バイオマス発電システムの開発を行っている。原料として、木質系バイオマスやごみ(紙・プラスチック)などから、オンサイトで電気・熱・液体燃料の供給を行う

BioMax シリーズを商品化している。

多くの公的機関や大学・企業(NREL, DOE, USDA, US Department of Defense, US Army, California Energy Commission など)からも資金面での協力があり、世界市場で小型分散型バイオマス発電システムを普及させるために、戦略的に開発を行っている。売上高は年間 4 百万ドルだが、2010 年には年間 5000 万ドルを目指している。

主要な研究テーマ

小型ガス化バイオマス発電システムを主要な研究テーマとしており、商品化にも成功している。現在開発中のものも含め、BioMax (5kW)、BioMax (15 ~ 100 kW)、BioMax FB (Fluidized Bed)、BioMax-Gas、BioMax-Liquid Fuel などが研究されている。また、ミシシッピ州立大学では BioMax ガス化炉を使って、様々なバイオマス材料をガス化経路でエタノールやアセテートなどに転換する研究がなされている。

特徴的な点(方針、設備、その他)

数メートルのパッケージで、木材チップを供給するとガス化を行って 5 キロワットから 100 キロワットの発電を行うことが可能なシステムである。日本のように 1 日数トン程度の収集量しか集められないケースが多い国にも適した装置であると考えられる。24 時間連続無人運転も可能であり、遠隔監視システムも搭載している。米軍からの資金協力で、移動式のシステムも研究されている。

木材チップが主な原料として使用されているが、図2に示すように、MSW・紙・プラスチックなど様々な原料が使用可能である。ペレットの加工が必要な物もあるが、多くの原料でそのままガス化が可能とのことである。



図 2 BioMax で使用可能な原料(CPC 了解を得て撮影)

図 3 に BioMax 50 - 100 の装置構成(A)・概略フロー(B)・装置写真(C)を示す。木材チップは、含水率 50%から 15%以下に乾燥して使用される。乾燥機を通過した木材チップは、固定床のガス化炉に入り、

生成されたガスは、ガス化炉は固定床型で、炉内温度や圧力などを連続的に測定し、燃料の自動投入や灰分の自動排出をコンピュータ制御するとともに、ガス気流の安定化などもはかっていると思われるが詳細は不明である。

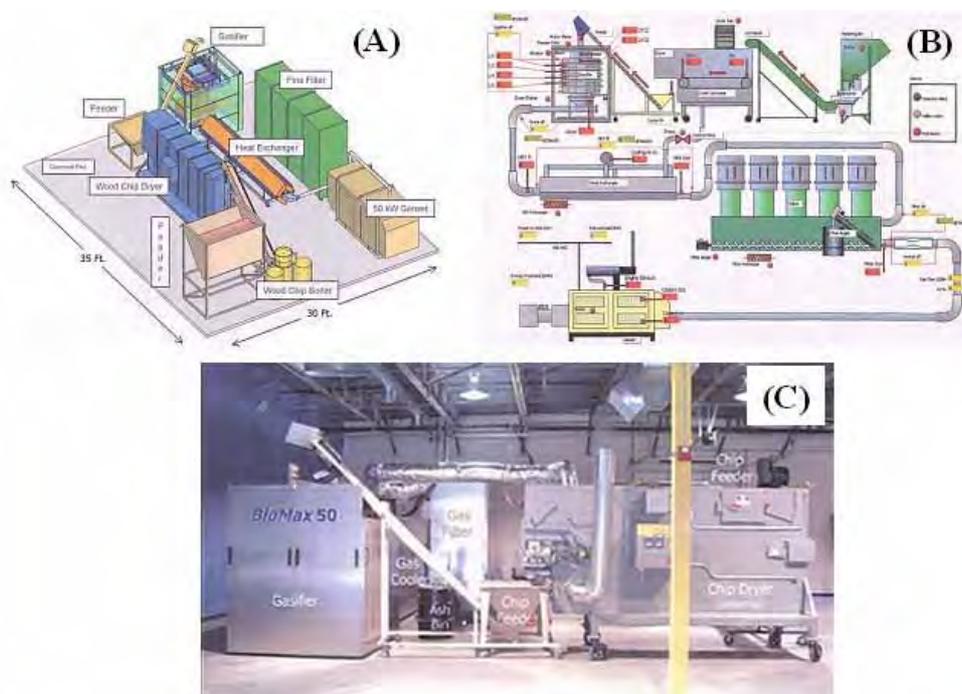


図3 BioMax 50 - 100 の装置構成・概略フロー・装置写真 (CPC 社配付資料)

生成されたガスは、冷却器、フィルタを通過し、ガスエンジンへ導かれる。固定床でありながら、タールがほとんどないとのことである。こればガス化炉の温度制御を厳密に行っていることよとの説明があったが、詳細は企業秘密であるとのことであった。ガス化炉の形状や供給空気量の最適化などのノウハウがあると思われる。精製されたガス組成は体積比で、 $CH_4 : H_2 : CO : CO_2 : N_2$ およびその他 = 2 : 20 : 20 : 7 : 51 とのことである。今後、効率や長期間運転についての詳しいデータの報告が期待される。

その他討議で分かったこと

BioMax 15 は、すでにいくつかの施設で導入されている。North Park High School (Colorado)では、2003年の9月から運転しており、間伐材を原料として得られた電気と熱はグリーンハウスで利用されている (Wood consumption: 3 lbs/kWh, Daily load: 6 to 8kW, 40-80 kWh)。毎日の運転操作も高校生が行っており、メンテナンスも週に30分程度で済むとのことである。また、Zuni Furniture Enterprises (New Mexico)においても2004年に導入されており、ほぼ同様の条件で運転されている。

BioMax 5 は Kawasaki のエンジン、BioMax 50-100 に関しては同一のエンジン。

運転中、Ash は3日～1週間に1回程度のクリーニングでよい。

冷却器で約700 のガスを100 程度に冷却している(次のプロセスに依存する)。

タールがないので、フィルタ後の水洗浄なしでガス精製できる。

ヨーロッパ、アジア、アフリカ、南アメリカなどのマーケットで、パートナーとなる相手を探している。ま

た、日本の企業からの視察などもかなりあるとのことである。

類似の研究を行っている組織

VTT (フィンランド)および Twente 大学(オランダ)などで、同様な研究がなされている。日本においても、東工大の吉川邦夫教授が開発された廃棄物ガス化発電技術を木質バイオマスのガス化に適した装置として実用化(新興プランテック、マイクロエナジー)した例などがある。

1.5 Novozymes, Inc.

<http://www.novozymes.com/cgi-bin/bvisapi.dll/portal.jsp>

DATE : hh:mm-hh:mm Dec. 08, 2005

PLACE : Novozyme, Inc
1445 Drew Avenue
Davis, CA 95616-4880

MEMBER: Joel R. Cherry, Director Biotechnology-Bioenergy
Sarah A. Teter, Senior Scientist
Paul Harris, Senior Scientist
K.C. McFarland, Senior Scientist
Feng Xu, Staff Scientist

-Visitors (G-TeC): 神戸大学 近藤 昭彦
京都大学 渡辺 隆司
JST/CRDS 横溝 修

Novozymes, Inc.報告(渡辺 隆司(京都大学))

機関概要

NOVOZYMES 社は、デンマークに本拠を置く世界最大の酵素メーカーであり、生産される 600 種を超える酵素は 130 ヶ国で使用されている。米国エネルギー省からの委託で、希硫酸前処理コーンストーバーの糖化コストを NREL が開発した前処理法と組み合わせることで 1/30 に下げる新規酵素の開発研究を実施した。概要は以下の通りである。

- 米国エネルギー省との研究契約は、当初 2001 年からの 3 年間で委託総額 1480 万 USD であったが、3 年間の研究期間が終了後、さらに 1 年の研究期間の延長と 230 万 USD の研究費の追加配分が認められた。この結果、研究プロジェクトの総額は 4 年間で 1710 万 USD となった。
- バイオマスの種類と前処理法の違いにより、最大の酵素糖化効率を与えるセルラーゼのコンポーネント構成は変わる。米国エネルギー省からの契約研究では、NREL が開発したコーンストーバーを希硫酸前処理したバイオマスの酵素糖化に特化した研究を実施した。対象となるバイオマスや前処理法が異なると、新たなセルラーゼの開発が必要となる。
- セルラーゼ開発においては、*Trichoderma reesei* のセルラーゼコンポーネントを組み合わせ、希硫酸前処理コーンストーバーに対して最大の糖化効率を与えるコンポーネント組成をスクリーニングした。この組成は、それぞれのセルラーゼコンポーネントを組み合わせることによる相乗効果が最



図1 NOVOZYMES 社での調査

大限発揮される組成である。次に、セルラーゼのマルチコンポーネントが設定した組成で発現するよう、*Trichoderma reesei* 由来のセルラーゼ遺伝子を単一の糸状菌を宿主に用いて異種発現させた。設定したセルラーゼコンポーネントの組成で発現させるために、最適なプロモーターを組み込んだ発現カセットを構築した。これらの研究開発の結果、同社の代表的セルラーゼ“セルクラスト”の2~3倍の糖化効率をもつ酵素を開発した。

- セルラーゼ開発研究においては、コーンストーバー中のホロセルロースの80%を発酵可能な単糖に加水分解することを目標とした。また、前処理から糖化発酵に至るプロセスに最適化したセルラーゼを開発し、糖化のコストを下げることを目指した。NRELのコストモデルでは、セルラーゼのコスト目標を\$0.10-\$0.18 / gallon EtOH に設定しており、NOVOZYMES社では、ラボスケールでNRELの希硫酸前処理法との組み合わせにより同目標の\$0.10-\$0.18 / gallon EtOH を達成した。これは、2001年の\$5.4 / gallon EtOH の約30分の1以下に相当する。
- 酵素糖化・エタノール発酵には、逐次発酵と併行複発酵があり、最適なセルラーゼの特性も異なる。両者を比較した場合、NOVOZYMES社が開発した新規酵素は逐次発酵においてより効果を発揮する。
- 米国エネルギー省は、NOVOZYMES社とともに、Genencor International社にも糖化に適したセルラーゼ開発研究を委託した。NOVOZYMES社が主として前処理法との関連や酵素と基質の相互作用に注目して研究開発したのに対し、Genencor International社は、炭素源の選択、セルラーゼの発現効率の向上、タンパク質工学的改良、酵素の回収など、セルラーゼの生産性に力点を置いた研究を実施した。
- バイオマスからのエタノール生産のために必要な研究開発としては、タンパク質工学、マイクロアレイ、プロテオミクス、バイオインフォマティクスを利用したセルラーゼの開発研究とともに、酵素糖化に適した前処理法の開発の重要性が指摘された。
- NOVOZYMES社のセルラーゼ開発研究において大学との連携は少ない。
- セルラーゼの糖化効率を評価するために、リン酸膨潤セルロースなどの非結晶セルロースを用いることは不適である。モデル基質の選択も、セルラーゼの開発研究にとっては重要である。
- NOVOZYMES社が開発した新規酵素は、2006年にNebraska州YorkのAbengoa社のパイロットプラントで実証試験を実施する予定である。Abengoa社は、米国と欧州でバイオエタノールの事業を展開している。



図2 新規酵素の実証試験を予定している Abengoa Bioenergy Corp のパイロットプラント

(http://www.eere.energy.gov/news/news_detail.cfm?news_id=9004 より

(著作権: Abengoa Bioenergy)

参考ホームページ

NOVOZYMES 社

<http://www.novozymes.com>

NOVOZYMES 社の DOE プロジェクト関連記事

<http://www.novozymes.com/cgi-bin/bvisapi.dll/press/press.jsp?id=32730&lang=en>

http://www.eere.energy.gov/news/news_detail.cfm?news_id=9004

Genencor International 社の DOE プロジェクト関連記事

http://www.genencor.com/wt/gcor/pr_1098313606

Novozymes, Inc.報告(近藤 昭彦(神戸大学))

1.要旨

Novozyme 社は世界最大の酵素メーカーであり、合衆国においては、Davis が基礎研究の中心である。Novozyme 社は NREL および Genencore 社とともに、セルラーゼの高機能化に関するプロジェクトに参加している(4年間のプロジェクトで1年間延長)。このプロジェクトでは、リグノセルロース資源からのエタノール生産において、コストに占める比率の高い前処理と糖化プロセスのコストを飛躍的に低減させることにある。プロジェクトの目標は、酵素コストを10セント/ガロン-エタノールまで低下させることであつたが、現在5セント/ガロンまで低下させることに成功しているとのことである(従来のコストの1/20程度)。ターゲットのバイオマスはコーンストーバーである。

2.組織概要(歴史、背景、特徴、方針/戦略)

NREL プロジェクトにおいて、Novozyme 社は酵素の改良による比活性の向上およびホスト-ベクター系の改良による生産性の向上を目指した研究開発を行っている。ここで、バイオマスの前処理は酵素活性に大きく影響を与えるので、NREL と綿密に共同開発を行っている。前処理(酵素が働きやすくする)と糖化を別々に行うと汎用性のあるプロセスとなると期待される。バイオマス原料によって最適な酵素は異なるとは、考えられるが、多くのバイオマスでよく働く酵素の開発を目指している。

3.主要な研究テーマ(目的、目標、レベル)

バイオマス糖化酵素の高機能化と低コスト生産

酵素コストの低減においては、大きく三つのアプローチを取っている。すなわち酵素の比活性の向上と、酵素の組み合わせによる反応性の向上、最適な組み合わせでの酵素生産性の向上である。酵素としては、*T.reesei* の CBH1 と *A. celluloriticus* の EG1 を中心に検討している。

- 1) 酵素の比活性の向上・・・酵素の活性向上のアプローチとしては、進化工学的アプローチを取っている。特に酵素の耐熱性の向上を目指している。これは、高温での処理によって酵素によるバイオマス分解反応性が大きく向上するためである。
- 2) 酵素の組み合わせの最適化による反応性の向上・・・酵素を適切な組み合わせで使用することで、バイオマス分解反応性が大きく向上するため、その最適化を行っている。
- 3) 酵素生産性の向上・・・酵素生産においては、一つの微生物で行えることが極めて重要である。Novozyme 社では、*T. reesei* を宿主として必要な遺伝子総てを組み込んだ株の開発を行っている。つまり、あらかじめ最適な酵素の種類と酵素量を見つけておき、出来るだけそれに近い組成となるように酵素を生産する。*T. reesei* はもともとセルラーゼ生産菌であり、セルラーゼ生産には適した菌であるため、これにセルラーゼ遺伝子をさらに導入することで、高生産株を開発することが可能となる。*T. reesei* における生産性をさらに向上させる

ために、マイクロアレーやプロテオーム解析を活用している。現在の問題点としては、利用できるプロモーターが少ないことから、酵素組成の最適化は難しい点が上げられる。

4.特徴的な点(方針、設備、その他)

Novozyme 社はカビを利用した生産系に関する基本特許を有しており強みを持っている。また、各種酵素の進化工学による改変においても、大きな実績を持っており、これらの技術を活用して、酵素生産コストの低減を図っている。

5.その他討議で分かったこと

- 1)バイオマス糖化用の酵素開発においては適切な基質を用いて評価を行っていくことが極めて大切である。Novozyme 社も当初、酵素の高機能化の評価においてリン酸膨潤セルロースを用いていたが、その結果と、コーンストーパーでの結果は大きく異なっていたとのこと。
- 2)Novozyme 社では、*A.oryzae* は基礎検討に使っているとのこと。
- 3)Novozyme 社では分子育種が中心であるが、Genencore 社では培地の検討などプロセス検討にも力を入れており、多少研究開発の色合いが異なる。
- 4)バイオマスを発電用に利用する場合においても、酵素による前処理を行うことで、効率が大幅に向上するとのこと。

6.類似の研究を行っている日本の組織、個人(状況、レベル比較)

T. reesei などのカビの生産するセルラーゼの構造機能解析や高機能化に関しては、長岡科学技術大学の森川教授や大阪府立大学の川口教授らのグループが精力的に取り組んでいる。一方バクテリアのセルロソームに関する研究では、三重大学の栗冠教授のグループが研究を行っている。またセルラーゼの高機能化に関しては、京都大学の植田教授のグループが取り組んでいる。

一方、*A.oryzae* による酵素生産に関しては、月桂冠や大関をはじめとする酒造メーカーが精力的に研究開発を行ってきており、世界的にも極めて高いレベルにある。ただ、カビによる異種タンパク質生産に関する基本特許が Novozyme や Genencore に抑えられている関係上(2008年に期限切れ)、現在のところ積極的な商業化は行われていない。各社 2008年を目指して研究開発を行っている。

1.6 Hawaii Natural Energy Institute (HNEI)

ハワイ大学ハワイ自然エネルギー研究所

<http://www.hnei.hawaii.edu>

横山伸也(東京大学)

DATE : Dec. 19, 2005

PLACE : Hawaii Natural Energy Institute, School of Ocean and Earth Science and Technology(SOEST), University of Hawaii at Manoa

Address: 1680 East-West Road, POST 109, University of Hawaii at Manoa
Honolulu, Hawaii 96822, U.S.A.

MEMBER: Professor Michael J. Antal, Jr.
Dr. Teppei Nunoura

-Visitors (G-TeC):横山伸也、東京大学大学院農学生命科学研究科 生命・環境工学専攻

1.要旨

ハワイ大学の SOEST におけるアンタル教授は、下記に示す4分野の研究を行ってきたが、最近バイオマスの炭化技術とリグノセルロースの水熱処理によるエタノール発酵の前処理技術を中心に研究展開を図っている。これまでの研究の背景、特徴、方針などについて説明し、国際比較をする。

2.組織概要(歴史、背景、特徴、方針/戦略)

ハワイ大学のアンタル教授は、プリンストン大学で数学を専攻し卒業後、ロスアラモス科学研究所(LASL)で熱核化学の分野でソフトウェアを使ったシミュレーション(数値解析)の仕事に携わった。この間に、第一次石油ショックを経験し、再生可能エネルギーであるバイオマスから熱化学的な手法で水素を製造する化学工学的な研究を進めた。しかし、研究環境が悪化したためプリンストン大学に移り数学的な素養を生かしながら、バイオマスのガス化や熱分解などの基礎研究をTGA(熱天秤)やDSC(示差熱天秤)を用いて開始した。その後、ハワイ大学に移り Coral Industries Chair を得て、以下の分野の研究を開始した。

バイオマスからの超臨界ガス化による水素製造の研究を行った。これはロスアラモスのLASLでの、バイオマスの水蒸気改質の研究に端を発している。

超臨界水を用いたバイオマスからの有用ケミカルズ(フルフラール、ヒドロキシルメチルフルフラール)やエタノールからのエチレン、プロパノールからのプロパン生成の反応機構の研究を行った。

リグノセルロース系バイオマスを 220 で1,2分水熱処理することにより、ほとんどのヘミセルロースと約半分のリグニンが可溶化し、残留物としてセルロースを分離することができる。エタノール発酵の前処理技術(酵素糖化)として利用できることを、ダートマス大学との共同研究で明らかにした。

バイオマスの熱分解の基礎的な研究に基づき、バイオマスから新しい手法によりバイオカーボンの製造を行っている。最新の研究によれば、フラッシュカーボニゼーション法で木炭を極めて短時間に製造することができる。高圧のダウンドラフト法で、大量生産を目指したデモンストレーションプラントを建設している。将来的には、バイオカーボン燃料電池の電極に使うことも視野に入れて研究展開を行っている。

と に関しては、現在は研究を中断している。水熱ガス化による水素製造技術は、注目すべき技術であるが、NRELの経済性評価により石油価格に比べて4倍程度高いと判断され、超臨界水熱による水素製造とケミカル製造の技術は事実上終了している。しかし、この技術に関連して、わが国では、産業技術総合研究所バイオマス研究センターと広島大学の松村幸彦助教授のグループが新たな研究展開を図っている。石油価格が高騰している昨今の状況を考えると、副成するCO₂を除去する新たな方法も提案されており、水熱ガス化による水素製造技術は有望であろう。

3.主要な研究テーマ(目的、目標、レベル)

現時点では、バイオマスの炭化技術とリグノセルロースの水熱処理技術であるが、前者に注力している。

(1)バイオマスの炭化技術

木質系や草本系バイオマスから、経済的な手法で木炭を製造することを目的としている。従来法では反応に数日を要するが、フラッシュ的な手法により極めて短時間で木炭を製造する。当面は、ハワイに産するマカダミアナッツの殻を使って炭化しているが、この技術はバイオマスはじめプラスチックなどにも適用できるとしている。エネルギーの観点からは、石炭に代替する再生可能資源として大量に製造することを目的としているが、バイオカーボン燃料電池の電極としての可能性も視野に入れている。反応条件が高圧であるという制約はあるが、バイオカーボンの製造方法としては、短時間で効率よく製造できる利点は評価できる。

(2)リグノセルロース系バイオマスの水熱処理によるエタノール製造

水熱処理により、リグノセルロースのセルロースをヘミセルロースとリグニンから分離する技術を開発している。リグノセルロース系バイオマスからエタノールを製造するためには、バイオマス中に含まれるセルロースとヘミセルロースをリグニンから分離して、酸や酵素で糖化して発酵しなければならない。前処理としては、メカノケミカルな手法、爆碎的な手法、酵素による手法があるが、水熱処理だけではまだ満足な結果が報告されていない。この手法によれば、バイオマスから微結晶セルロースの製造にも有効とされている。

4.特徴的な点(方針、設備、その他)

(1)バイオマスの炭化技術

アンタル教授のアイデアは Flash Carbonization であり、これはバイオマスから極めて短時間で木炭(バイオカーボン)を製造するプロセスである。ラボスケールの実験により、1時間以内にバイオマスが炭化することを見だし、平衡論及び化学工学的な考察から、新しい重要な知見を得ている。すなわち、高圧にすることで炭化収率が大きく向上すること、原料中の水分濃度が炭化収率に大きな影響を与えないことなどである。温度400 ~ 600、空気圧約10kg/cm²で、バイオマス重量の約40%が木炭になると報告している。ラボ実験では、マカダミアナッツの殻、ヤシ殻や各種の木質バイオマスを炭化に供した。このような結果を基礎に、デモスケールのプラントの設計をして、ハワイ大学構内に大型デモプラントを建設した。これは、直径34インチ(約85cm)、高さ9フィート(約2.7m)バイオマスを入れる円筒状の反応缶と高圧ベッセルから成っている。バイオマスを密閉した反応缶を高圧ベッセルに入れてコンプレッサーで空気を圧入して、底部で着火する。コンプレッサーの性能が十分ではないので、酸素供給が足りず、

炭化に約1時間を要するが、コンプレッサーの性能が十分であれば 30～45 分程度には短縮できるということである。原料としては、樹木の枝、ココヤシの殻など堅いバイオマスは木炭に、木くずや草本系バイオマスは、土壌改良剤としてポット用に使える。このデモプラントは、フル稼働時には8時間で約4トンのバイオマスを炭化する能力がある。このプラントの建設費は約 20 万ドルであるが、ハワイ大学構内で排出される廃棄物系バイオマスを処理すると約 10 万ドルの収益があがると予想される。この技術はバイオマス以外のシュレッダーダストや廃タイヤなどにも適用ができ、炭化物はバーベキュー用、大気汚染浄化、水質浄化、製鉄用にも使え、純度の高いものは炭素燃料電池として使える。また、反応終了時にプラントから排出されるガスは、周辺環境保全を考慮して、触媒方式のアフターバーナーを備えている。

(2) リグノセルロース系バイオマスの水熱処理によるエタノール製造

水熱処理により、リグノセルロースのセルロースをヘミセルロースとリグニンから分離する技術を開発している。アンタル教授は、リグノセルロース系バイオマス例えばコーンの葉やシュガーケーンバガスを 220 で 1～2 分間水熱処理するだけで、ほとんどのヘミセルロースと約半分のリグニンを可溶化できることを見いだした。可溶化したペントサンは 80%以上がオリゴマーとして存在した。グルカンはエタノール発酵の反応性が高く約 90%がエタノールに転換された。可溶化した生成物がグルコースの発酵に阻害効果がないことも注目される。発酵に関してはアンタル研究室では行っておらず、斯界の権威であるダートマス大学のリンド(Lee R. Lynd)教授の研究室で行われている。この手法は酵素糖化 - 発酵に最も適しており、エタノール収率はこれまで報告された中で最高と評している。NRELもこの方法を高く評価しているが、建設費が 300 百万ドルと予想しておりアンタル教授との見解とは異なっている。

5. その他討議で分かったこと

(1) バイオマスの炭化技術

実際にプラントと炭化物を見て、コンプレッサーの性能が低く、予想された炭化が十分に進行していないようであった。アンタル教授は、バイオカーボンに石炭の代替物として将来性を期待しているが、原料の価格次第で、逆有償的な場合には経済的に成立するのではないかと懸念している。発電の場合には、そのままのバイオマスで使うより炭化の優位性がどこにあるのか不明であるが、精錬用を使う場合は環境負荷を考慮すれば理解できる。当面は1万トン規模を想定しているが、バーベキュー用木炭などの場合には量的な規模の拡大は期待できない。空気加圧方式ではあるが、フラッシュ的な炭化で極めて短時間に炭化が行われるのは魅力である。触媒方式のアフターバーナーを取り付け、環境保全の対策を講じているのも注目される。特許に関しては、US Patent: 6,790,317 を取得している

(2) リグノセルロース系バイオマスの水熱処理によるエタノール製造

アンタル教授の率いるグループは実質的に数名であり、炭化の研究に重点を置いているように思われる。本研究はダートマス大学のリンド教授のグループとの共同研究であり、発酵技術はアンタル教授の専門外である。このような水熱技術により、発酵の前処理である酵素糖化の結果が良好で、発酵でも従来法に比べて優れた結果が出ているのは興味深い。

6.類似の研究を行っている日本の組織、個人(状況、レベル比較)

(1)バイオマスの炭化技術

東京大学 矢田貝光克教授

木質系バイオマスの炭化技術と生理活性物質の抽出、利用。

北見工業大学 化学システム工学科 鈴木 勉教授

木材からニッケルを含浸させた高機能炭素製造を行っている。比較的低温(900)で炭化し炭化物に対して4~5%のNiを含浸させ、電磁波シールドに使う。

京都大学 生存研究所 今村 祐嗣教授

バイオマスを高温(1200)で炭化して結晶化する。高機能炭素の製造。

森林総合研究所 樹木化学研究領域、成分利用研究領域

木質系バイオマスの炭化技術。住宅の調湿剤、水質浄化などが目的。木材から分離したリグニン由来の炭素電極の製造。

産業技術総合研究所(旧工業技術院北海道工業技術研究所)

木材からの炭化技術により高表面積を有するスーパー活性炭の製造。

この他、民間企業では廃棄物系バイオマスの炭化技術を一部商業化しているが、アンタル教授の行っているフラッシュカーボニゼーション的な手法はない。逆に、北見工業大学や京都大学で研究されている高機能炭素製造は、アンタル教授との方向性とは一線を画している。

(2)リグノセルロース系バイオマスの水熱処理によるエタノール製造

産業技術総合研究所バイオマス研究センター

水熱化学とメカノケミストリー技術によりバイオマスの前処理を行っている。水熱反応ではアンタル教授らと同様の結果を得ている。メカノケミストリーでは糖化収率が70%程度である。ただ後段のエタノール発酵とリンクしていない嫌いがある。

月島機械(株)では希硫酸により木材を糖化し、(株)日揮では濃硫酸を使い大規模でエタノール製造の研究開発を行っている。

私見ではあるが、アンタル教授らの結果は産業技術総合研究所での結果とほぼ同様と推測される。産業技術総合研究所でも、発酵技術とリンクした研究を開始している。

2. 欧州

2.1 VTT Technical Research Center of Finland(生化学)

<http://www.vtt.fi/>

坂 志朗(京都大学)

DATE : 13 March, 2006
PLACE : VTT Technical Research Center of Finland
Tietotie 2, Espoo, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
MEMBER: Prof. Merja Penttila, biotechnology
Prof. Liisa Viikari, biotechnology
Dr. Niklas von Weymarn, biotechnology
Dr. Tuula Makinen, thermochemical conversion
Dr. Marita Niemela, thermochemical conversion
Dr. Matti Nieminen, thermochemical conversion
Dr. Anja Oasmaa, thermochemical conversion
Dr. Matti Reinikainen, thermochemical conversion

Visitors (G-TeC) 坂 志朗(京都大学 大学院エネルギー科学研究科 教授)
天野 良彦(信州大学工学部 物質工学科 生物化学研究室 教授)
粟冠 和郎(三重大学 生物資源学部資源循環学科 教授)
北川 尚美(東北大学 大学院工学研究科 助教授)
鈴木 隆幸(JST 科学技術連携施策群支援業務室 主監補佐)
平井 秀一郎(CRDS フェロー)
大矢 克 (CRDS アソシエイトフェロー)

面談概要

1) VTT の概要説明(Prof. M. Penttila)

- VTT は MITI(通商産業省)の下部機関の国立研究所で企業化につながる応用研究を行っており、研究所内はすべて写真撮影禁止であった。
- 国立研究組織としては北欧最大規模の研究所(職員数:2,800人、総収入:2億1,300万ユーロ)である。
- R&D は 7 研究群(研究分野)、45 研究センターから成り立っている。その中で、特に今回の訪問に関連している研究群は、Biotechnology および Energy and Pulp and Paper 分野で、其々の分野に下記に示す多くの研究員と研究センターを配している。
Biotechnology 分野:240 研究者、5 研究センター
Energy and Pulp and Paper 分野:390 研究者、7 研究センター
- 研究群(研究分野)には、Director、Research Professor、Chief Research Scientist を配し、国際的に高度な技術による戦略的研究がなされている。

- 財政的には、政府資金 34%、国内民間資金 14%、国外民間資金 12%、国内公共団体資金 28%、国外公共団体資金 11%であり、民間、公共団体からの資金援助が研究所運営の軸となっている。そのため、民間からのニーズが研究に反映されていることが不可欠な状況にある。そのせいか、面談中しきりに我々との共同研究への誘いが各研究者からなされた。

2) 研究分野説明

- Biotechnology 分野では、280 人の研究者(別表 240 研究者と数値が矛盾している)によるバイオニア的バイオサイエンスの研究がなされている。
- Biotechnology 分野では、“White Biotechnology”なる聞き慣れない表現が見受けられたが、この表現はヨーロッパでは一般的で、企業志向の強いバイオテクノロジー・バイオリファインリーの研究開発を意味するとの説明であった。すなわち、バイオテクノロジーの分野では、化石資源の利用を断ち切り、循環型バイオマス資源の利用に取り組もうとする企業の戦略が重要視されていることがうかがえる。
- VTT Biotechnology の戦略的研究分野は、酵素化学関連、加水分解関連、繊維化学加工関連などであり、バイオマスガス化、グリーンケミストリー、燃料電池、材料科学、ナノテクノロジーなどの分野研究の協力体制が整っている。
- 酵素関連分野では、セルロース、ヘミセルロース、リグニンの分解酵素であるセルラーゼ、ヘミセルラーゼ、ラッカーゼや、セルラーゼを生産する糸状菌 *Trichoderma reesei* などのタンパク工学に関し、長い歴史と多くの知見を有している。
- 紙パルプ分野では、酵素漂白やバイオマスの加水分解によるエタノール生産、酵素による繊維加工などの研究が主なものとして挙げられる。
- 短期研究として、種々のバイオマス(トウモロコシ、リグノセルロース、都市ごみ、植物廃棄物など)に対する酸触媒やセルラーゼ、ヘミセルラーゼを用いた酵素分解によるバイオマスの前処理(単糖化)、そこから得られるグルコース、キシロース、アラビノースなどの単糖に対する微生物、バクテリア、酵母を用いたエタノール発酵の研究がなされている。特に、安価なバイオマスとしてトウモロコシ(84 ¢/トン)、廃トウモロコシ(30 ¢/トン)が注目されている。
- バイオマスのエネルギーへの変換法のひとつとして、バイオマスの主要な構成成分であるセルロースおよびヘミセルロースの単糖化とそれに続くエタノール発酵がある。単糖化のプロセスには酸加水分解法と酵素糖化法があるが、後者は前者に比べて緩和な温度条件で反応が進むことから、有利な点が多い。結晶性セルロース(セルロースマイクロフィブリル)の加水分解にはセロビオヒドロラーゼが必須であり、得られたセロビオースの分解には endo-グルカナーゼが関与している。キシランの分解に対してはエンドキシラナーゼが、またグルコマンナンの分解にはエンドマンナナーゼ、アセチルグルコマンナンエステラーゼが、リグニンにはラッカーゼやパーオキシダーゼが関与している。これらの酵素分解についての研究が進められている。
- 酵母は、従来、ヘキソース(6炭糖)に対して用いられるが、ここでは、特にペントース(5炭糖)に対して以下の研究を行っている。

加水分解物に耐性のある *Saccharomyces* 菌株の培養

Saccharomyces によるキシリトール生産

種々の酵母によるキシロース生産

- バイオリファイナリー分野では、バルクケミカルスやファインケミカルスの研究に取り組んでおり、抗生物質の創製、ビタミン、キシリトール、アミノ酸などのファインケミカルス、乳酸からのポリ乳酸、1,3-プロパンジオールからのポリエステル、ポリ-β-ヒドロキシ酪酸(PHB)などの生分解性ポリマーの創製研究が進められている。
- 木材の紙・パルプ工業におけるリファイナリー分野では、以下のケミカルスの抽出が行なわれている。

樹皮.....スベリン成分

パルプミル.....トール油、脂肪酸

パルプ廃油.....フェノール類、メタノール、炭水化物 などのケミカルスの抽出による高付価値化

- 長期的研究として、リグノセルロースの水蒸気ガス化による CO、H₂、CO₂ 製造とそれらを用いた微生物によるエタノール変換の研究もなされている。帰国後、詳細を問い合わせたが、現在ガス化の研究が主たるもので、CO、CO₂ と H₂ からのエタノールへの酵素変換については今後の検討に期待しているとの回答を得ている。類似の研究は米国 NREL で行われているが、酵素ではなく金属触媒によるものである。

2.2 VTT Technical Research Center of Finland(ガス化)

鈴木 隆幸((独)科学技術振興機構)

DATE : 13 March, 2006 14:00-17:00

PLACE : VTT Technical Research Center of Finland

Tietotie 2, Espoo, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland

MEMBER: Anja OASMAA: VTT Energy. Fuel Processing Laboratory. Senior Research Scientist,PhD,. Telephone: 358 9 456 5594. Fax: 358 9 460 493. E-mail: anja.Oasmaa@vtt.fi.

Matti Nieminen :VTT Processes.,Gasification and Gas Cleaning,, Senior Research Scientist,MSc,,. Telephone: 358 20 722 6587. Fax: 358 20 722 7048 E-mail: matti.nieminen @vtt.fi.

-Visitors (G-TeC):坂 志朗(京都大学 大学院エネルギー科学研究科 教授)

天野 良彦(信州大学工学部 物質工学科 生物化学研究室 教授)

粟冠 和郎(三重大学 生物資源学部資源循環学科 教授)

北川 尚美(東北大学 大学院工学研究科 助教授)

鈴木 隆幸(JST 科学技術連携施策群支援業務室 主監補佐)

平井 秀一郎(CRDS フェロー)

大矢 克 (CRDS アソシエイトフェロー)

1. 要旨

午前中は生物学的変換に関して討議を行ったが、ここでは午後を実施した熱化学的変換技術に関するヒアリング、質疑応答の内容を報告する。

バイオマス熱分解・液化燃料技術及びバイオマスガス化技術について聴取した。開発は、実用化を重視しており、市場を見据えて規模別、原料別に戦略的に行われている。開発技術の技術提携(売り込み)の熱意が感じられた。

2. バイオマス熱分解・液化燃料技術

2.1 説明者: Anja Oasmaa 氏

2.2 実証試験プラント(PDU ユニット)

(1) プラントフロー(図1参照)

熱分解炉(流動層) 集塵機(サイクロン) 凝縮器(液化燃料凝縮) デミスタ - 熱分解炉

(2) 装置概要

熱分解炉(Fluid bed reactor): 熱分解温度 500 。滞留時間 1 秒。1 気圧。流動層の砂経についてはノーコメント(これは重要なノウハウなので当然と思われる)。供給原料はのこぎり屑(バーク分を除く)、供給量 20kg/h、平均経 3mm(2mm ~ 6mm)である。スタート時は加温が必要である。運転は自動制御によって行われる。

サイクロン (Cyclone) : チャー等の未燃固形分を分離する。分離チャーは熱分解炉に循環され、熱源として燃焼される。

凝縮器 (Condenser) : 冷却は凝縮器下部に落下した液化燃料を凝縮器に循環して行われる。液化燃料は貯留タンクに導入される。液化燃料生産量 : 0.4 ~ 1.0t / 週である。

(3)原料

熱分解炉供給原料は自然木ののこぎり屑の他、廃材も利用可能である。液化燃料回収率は、木種によって異なる。松が多く枯れ木が少ない(図2)。マレーシアの EFB (アブラヤシ空房) の液化試験も実施している。

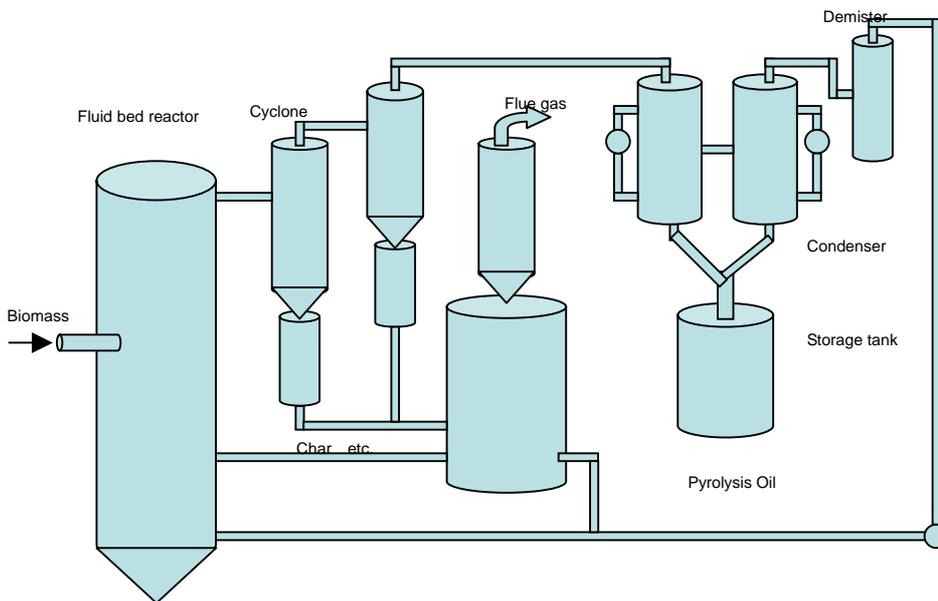


図1 VTT Fast Pyrolysis Process Development Unit
(Fuel capacity 20kg/h)

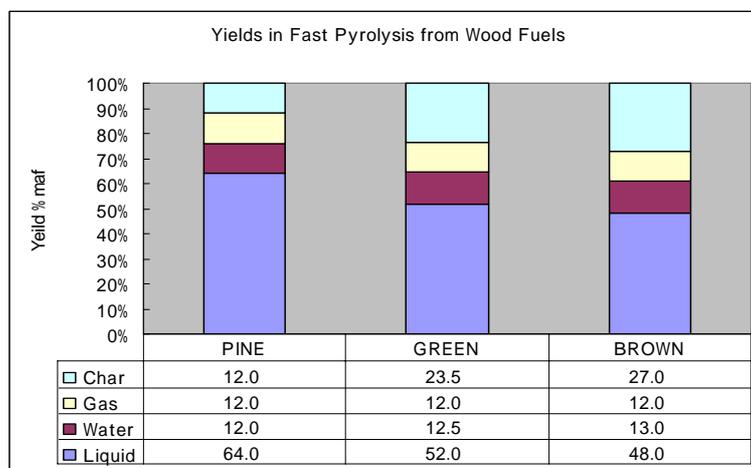


図2 液化燃料回収率

(4)液化燃料性状

性状を表 1、図 3 に示す。発熱量(LHV)は 13-19MJ(約 3000-4500Kcal/kg)と比較的高発熱液であるが、図 3 に記載されているように糖分が多いので用途が限られると思われる。

表 1 Pyrolysis Liquid properties

Heating value	13-19 MJ/kg (LHV)
Acidic	pH 2-3
Flash point	40-65
Density	1.15-1.2 kg/l
High ignition temperature	
Viscosity	between that of light and heavy fuel oils
Unmiscible with mineral oils	
Polymerizes slowly	

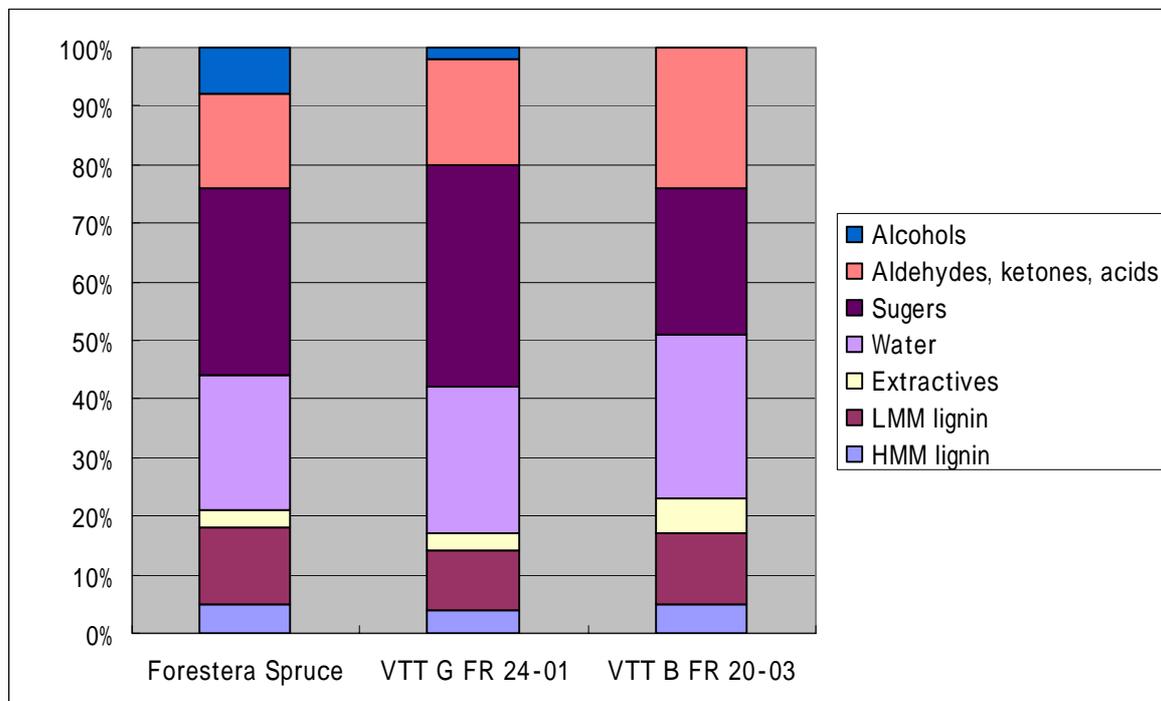


図 3 Product quality based on physico-chemical characterisation

3. バイオマスガス化技術(説明者:Matti Nieminen 氏)

熱分解ガス化技術について開発の歴史から現在の技術について説明を受けた。開発戦略は、小中規模、大規模(発電効率大)、及び対象バイオマス(木質、廃棄物)に分けてそれぞれの特徴を出している。その中の代表的でプロセス的について紹介する。

3.1 小規模型下降流式ガス化炉 (図4参照)

本炉は、原料が上部から流下するにしたがって順次、乾燥、熱分解、酸化、還元され、下部からチャー、タールフリーのガス(可燃ガス組成:水素、メタン等)が生産される構造である。還元ゾーンでガス中のタール、チャーが分解される。原料としてブリケット化したものが望ましい。

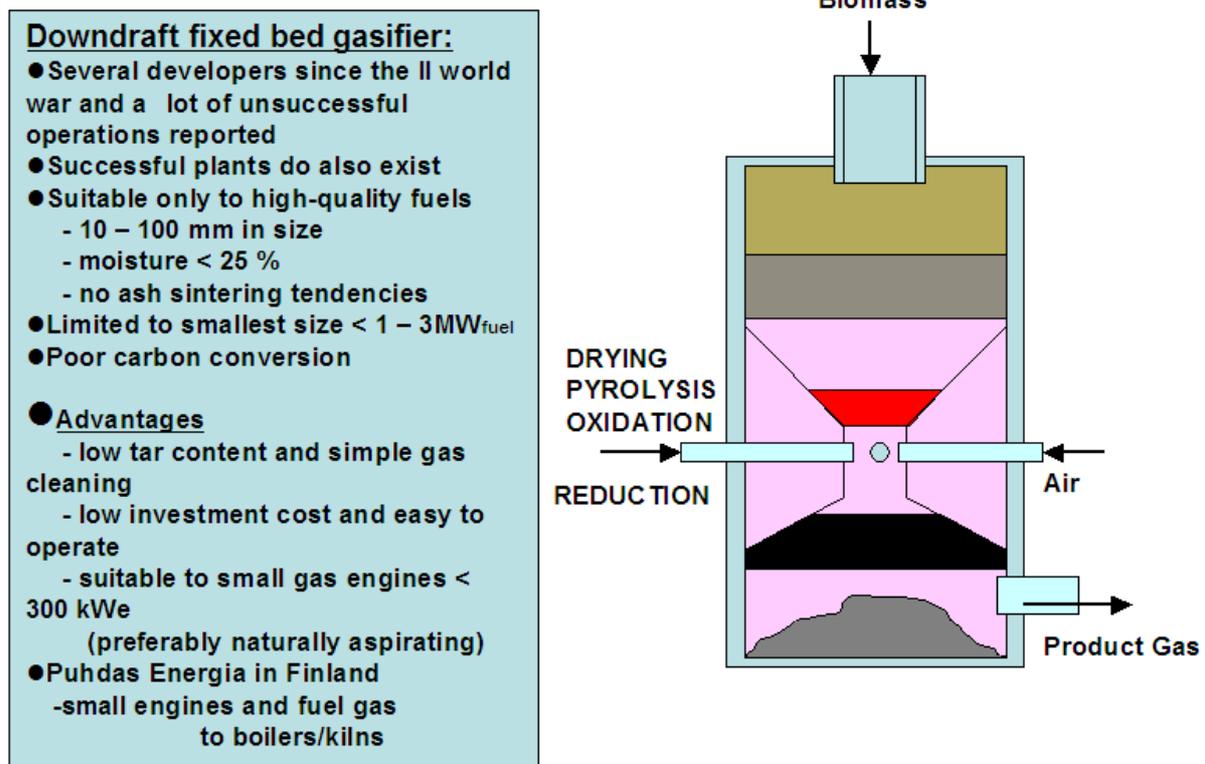


図4 小規模型下降流式ガス化炉

3.2 Novel power plant

VTT の一般型ガス化発電システムである。Novel ガス化炉のガスは、触媒式タール分解後、ガス冷却、濾過、アンモニア除去用スクラバヤーにより順次浄化され、発電用のレシプロエンジンに供される。発電コスト(建設費込み)は5セント(7.5 円 / kWh :150 円 / ユーロとして)であり、極めて低廉である。触媒の性状は不明である。VTT ではタール分解用アルミニウム触媒のpatentを日本に譲渡した実績があると報告している。Novel 発電プラントのフロー、性能を図5に示す。

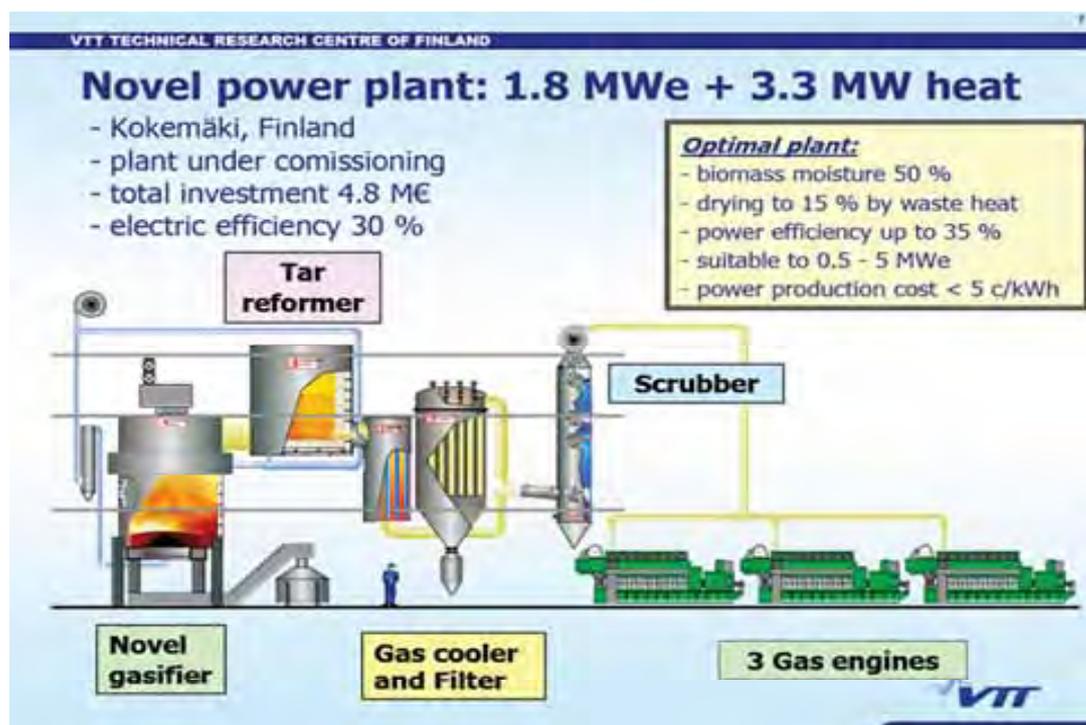


図5 Novel power plant

3.3 アルカリ性廃棄物混焼プロセス

高濃度アルカリ廃棄物処理が可能としている。基本的フローを図6に示す。本フロー特許されている。

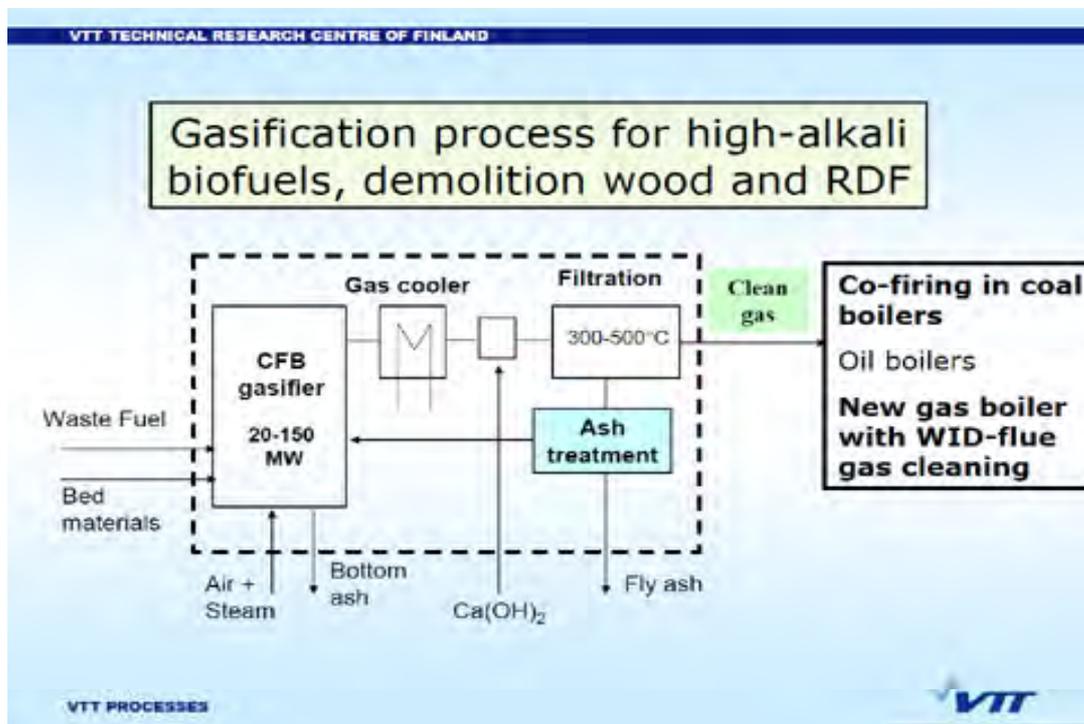


図6 アルカリ性廃棄物混焼プロセス

2.3 Institute for Agrobiotechnology (IFA-TULLN)

Department of Environmental Biotechnology

鈴木 隆幸((独)科学技術振興機構)

DATE : 10:00-15:00 15March, 2006

PLACE : Konrad Lorenz Strasse 20, A-3430 Tulln, Austria

Tel: +43-2272-66280-502

Fax: +43-2272-66280-503

MEMBER Professor Rudolf Braun, Project Manager

Dr.Markus Neureiter

Visitors (G-TeC): 京都大学 坂 志朗

東北大学 北川 尚美

JST/CRDS 平井 秀一郎

JST/科学技術連携施策群支援業務室 鈴木 隆幸

1.要旨

午前中は生物学的変換に関して説明を受け、午後からはエネルギー穀物メタン発酵プロセスを視察した。生物学的バイオマス変換技術は、畜産廃棄物、エネルギー作物等を原料としたメタン発酵によるバイオガス生産が中心であるが、現在はバイオエタノールの研究開発及び生産も推進している。

2.オーストリアのバイオマスエネルギー目標

(説明者: Professor Rudolf Braun, Project Manager)

バイオマスエネルギー統計の概要について説明を受けた。バイオガスプラントはドイツに 3,000 カ所、オーストリアに 250 カ所(図 1 参照)設置されている。オーストリアのエネルギーの 10%が水力発電であるが、それに匹敵するのがバイオマスエネルギー(137PJ)であり、その 90%を木質燃焼で補っている。ヨーロッパの平均バイオマスエネルギー利用率は 3-4%である。

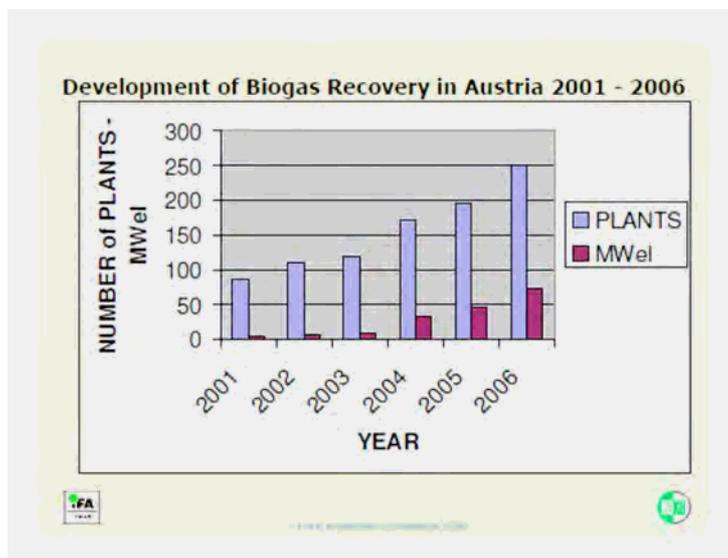


図 1 オーストリアのバイオガスプラント及び発電量

3. バイオマス利活用の背景及び利用技術

(説明者: Markus Neureiter)

バイオマス利活用を推進する背景は、京都議定書(オーストリア目標 13%削減)及び EU White Book “Energy for the Future”である。

3.1 バイオマス発電

(1) 電力料金

一般価格 50 ユーロ / MWh に比較すると、発電コストはバイオガス 103 ユーロ / MWh、バイオマス 102 ユーロ / MWh、風力 78 ユーロ / MWh で高額である。バイオマス発電を推進する理由を数多く述べていたが、その中で印象的であったのは農村地域の開発であった。

発電コスト(C/kWh: セント/kWh) は下記のように規模によって大幅に異なる。

表1 発電コスト

< 100kW	16.5 C/kWh
100 500kW	14.5 C/kWh
500 1000kW	12.5 C/kWh
> 1000kW	10.3 C/kWh

(2) オーストリアの実用バイオマス発電

オーストリアで実施されているバイオマスを利用した発電は、木質チップ CHP、木質バイオマス発電、バイオガス CHP である。

(3) バイオエタノールの生産

現在バイオディーゼルが利用されているが、バイオエタノールの生産も進められており、砂糖大根原料の 160,000t / y のエタノール工場を Pischelsdorf(Tulln の近く) に建設中である。

4. 研究開発の体制と方針

(説明者: Professor Rudolf Braun)

- ・ 研究員数は 50 ~ 60 人である。多くは非常勤であり、2, 3 年間のプロジェクトによって収入を得ているが、予算は非常に厳しい。IFA の財源の 60% は自主財源である。EU ファンドによるプロジェクト(12 人 6 ヶ国から構成)でバイオガス資源、プラント操作、前処理等の研究開発を進めている。メタン発酵残渣(消化脱離液)の有効利用は重要課題である。最終報告書は年末に発行する。バイオマス利活用では、新技術によるブレークスルー、経済性と科学、オーストリア独自のノウハウの利用を目標としている。
- ・ バイオマスによるエネルギー生産は、資源が高額なこともあり温室効果ガス削減にどの程度寄与できるか明確でない。
- ・ 遺伝子組み換え植物・菌に対してオーストリアは法的規制が厳しい。排水中の微量毒性物質分解遺伝子組込微生物の利用技術を有する機関との共同研究を考えている。

- ・BTL (Biomass To Liquid) プロセスのガス化でエネルギー効率を高めたい。BTL ではバイオテクノロジーを使わない応用研究が多い。
- ・バイオテクノロジーによるバイオマス燃料の高品質化、バクテリアによる安全性の高いバイオガスへの変換についても考えている。
- ・コンポストイングについても開発の余地がある。
- ・自栄養性細菌の大量培養、培養方法の研究開発も視野に入れている。

5. エネルギー穀物の貯蔵と前処理について

(説明者: Markus Neureiter)

5.1 サイレージ効果

サイレージにおける Crostridium (Clostridia Tyrobutyrium) の関与は実利用(メタン発酵)に影響しないが、酸発酵菌、乳酸菌はメタン発酵に対して改善効果(反応速度向上)がある。バイオガス発生量増加効果はない。サイロの容量は 2000 - 2900t (滞留日数: 4 ヶ月)。

5.2 エネルギー穀物前処理

- ・前処理(低分子化)で効果を出すためには、ヘミセルロース分解のため 140 - 180 °C、5-20 分、pH 2 - 3 以下の条件が必要である。サイレージにおける pH は通常 3 - 4 なので、加水分解のため少し pH を下げる必要があるが、硫酸を使うと消化で硫化水素が発生する。この条件で加温処理を行ってもメタン発生量は増加しない(報告者注: 加温処理による低分子化によって反応速度は上昇しても最終的な発生ガスの絶対量の増加には効果がないと予想される)。
- ・低分子化性能の確認のため液化サンプルを高速エキクロマトグラフィでグルコース、キシロース、アラビノース、オリゴサッカライド、モノサッカライド、乳酸、酢酸を測定する。
- ・メタン発酵施設ではトウモロコシ(TS32%)と水を 2 : 3 で混合後、前処理として蒸気によって加熱し、消化槽に導入する。管理項目として、TS、TVS、H₂SO₄ を測定している。また随時試験室室内でメタン発酵のバッチテストを行い、実施設におけるメタン発酵の進行状況を確認している。
- ・サイレージでは pH が低下するので水素発酵菌が増殖しないため水素は発生しない。Crostridium が出現すると水素を発生する。

6. エタノール発酵

リグノセルロース由来炭水化物を 60 °C で発酵する菌(Bacillus Streatothermophilus)を発見した。発酵槽 + 膜 + 蒸留の組み合わせで効率的な連続発酵システム構築の可能あり、12 - 13%濃度のエタノールを得ることができる。アイオジェン社(本社: オンタリオ州オタワ)が関与している。糖源としてペントース、ヘキソースも可能である。エタノールはバイオガスになりやすい。

7. エネルギー穀物メタン発酵施設視察

Markus Neureiter 氏の案内でエネルギー穀物(トウモロコシ)が主原料のメタン発酵施設を見学した。メタン発酵施設には夾雑物を除去するためのスクリュープレス等の機械的な前処理設備は配備されていない。中央監視室は日本と同程度の設備であった。発酵槽はコンクリート製で、覆蓋上には降雪・降雪による熱損失を防止するため、直径数 cm の砂利が敷き詰められている。発酵槽温度は 40 °C に維持さ

れ、発酵槽攪拌機はインペラ式(15kW)1機のみ設置されている。発電機は500kW 2機でオイルと併用方式である。試験室にはビーカスケールの簡単な発酵試験装置が備えられており稼働していた。

原料投入濃度はTSとして8-10%であり、生産された電力、熱は自家消費し、余剰電力は周辺住民に配給している。施設の物質収支を図2に示す。

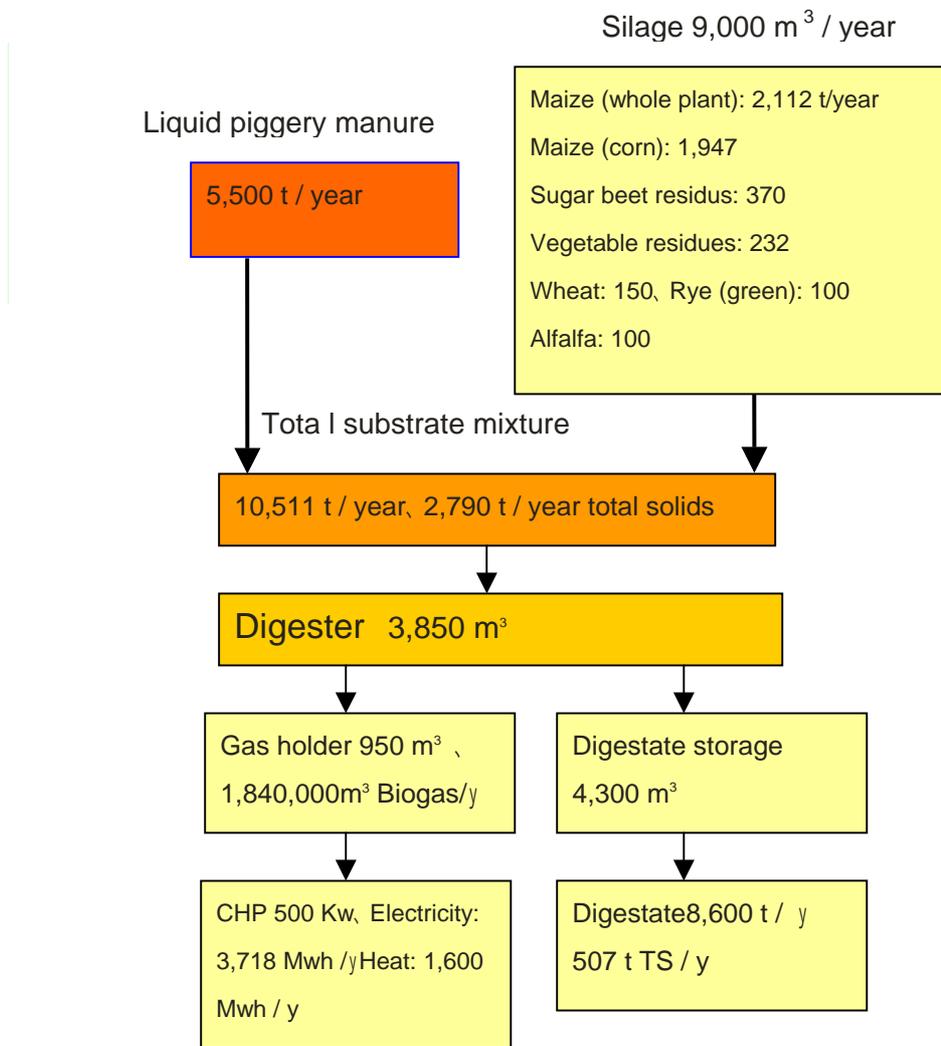


図2 エネルギー穀物メタン発酵プロセスフローシート・物質収支

2.4 BioDiesel International (BDI)

<http://www.biodiesel-intl.com/>

北川 尚美(東北大学)

DATE : 13:30-17:00 16 March, 2006
PLACE : BioDiesel International (BDI)
Parkring 18, A-8074 Grambach/Graz, Austria
MEMBER: Edgar AHN / 日本担当・主任開発研究員
-Visitors (G-TeC): 京都大学 坂 志朗
東北大学 北川 尚美
東京工業大学 平井 秀一郎
JST 科学技術連携施策群支援業務室 鈴木 隆幸

1. 要旨

バイオディーゼル燃料(BDF)を工業的に製造するためのプラント建設を手掛ける会社を訪問した。均相アルカリ触媒(KOH)を用いた製造法を採用しているが、原料油の前処理と製造したBDFの精製に関する優れた技術を有しており、植物油だけではなく廃食用油や動物油、グリースなど様々な油を原料として高品質のバイオディーゼル燃料を製造することに成功している。BDF製造プラントのオペレーションコストは驚くほど安く、安価な動物油を原料として製造規模を大型化することによって、経済性も保たれているようである。BDF製造に関する残された課題は、原料となる油をどのように確保するかであると考えている。日本では、均相アルカリ触媒を使用しない製造法の開発が盛んに行われているが、この点にはあまり興味がないように見られた。

2. 組織概要(特徴、方針/戦略)

種々の原料油とメタノールから高品質のバイオディーゼル燃料を製造するためのプラントを設計する会社である。Business Fieldsは以下の四つからなる。

- 研究&開発、コンサルティング
- エンジニアリング
- 建設と操業開始
- アフターサービス

特長は、テラーメイドで発注者が使用する原料油とその製造規模に合わせて個別にプラントを設計する点である。単一の原料油を用いるプロセス(Single-Feedstock Plant)や種々の原料油を組み合わせるプロセス(Multi-Feedstock Plant)など多種多様なプラント設計を行っており、これまで建設したBDF製造プラントは全て異なるものであるという。近隣のビルにあるエンジニアリング会社VTU-Engineering GmbHと、プロセス制御の会社M&R Automation GmbHをビジネスパートナーとし、グラーツ大学のMittelbach教授、グラーツ工科大学のMarr教授やEichlseder教授などと研究協力を行っている。対応して頂いた日本担当・主任開発研究員の方の名刺には、技術提携日本総代理店として緑産株式会社が記載されていた。

1991年に工業的なBDF製造プラント第一号を建設してから、2005年までに計10基のプラント建設を

行っている。今後、2007年までにさらに10基のプラント建設が予定されているとのこと。主な建設プラントの流れは以下の通りである。

1991年 工業的なBDF製造プラント第一号を建設

製造規模:1,500 to/y、原料:Rapeseed oil、建設地:Mureck / Austria

1994年 廃食用油を原料としたBDF製造プラント第一号を建設

製造規模:9,000 to/y、原料:Used Cooking Oil、建設地:Mureck / Austria

1998年 アメリカ合衆国で動物油脂を原料としたBDF製造プラント第一号を建設

製造規模:6,000 to/y、原料:Animal Fat、建設地:Butler, KY / USA

2001年 ヨーロッパで動物油脂を原料としたBDF製造プラント第一号を建設

(ドライクリーニング会社SARIA Bioindustries GmbHから受注)

製造規模:12,000 to/y、原料:Animal Fat、建設地:Malchin / Germany

2005年 動物油脂を原料とした高品質BDF製造のためのデモプラント第一号を建設

製造規模:50,000 to/y、原料:Animal Fat、建設地:Motherwell / Scotland

2006年 世界最大の製造規模のBDF製造プラントを建設中

製造規模:150,000 to/y、原料:vegetable oils、建設地:Vienna/Austria

3. ヨーロッパのBDF製造の現状

ヨーロッパでは、2003年に運輸部門におけるバイオ燃料(バイオディーゼルおよびバイオエタノールなど)の導入目標比率を全燃料に対して最低限、2005年に2%、2010年に5.75%と定めている。石油系ディーゼル燃料に関しては、5%までBDFをブレンドすることを目標としており、そのためには6.1 Mio to/y (EU15)のBDFを製造する必要がある。現在、ヨーロッパでは主に植物油(菜種油など)を原料としてBDFの製造を行っているが、植物油の供給が限られており価格が高騰していることなどから、used cooking oil, animal fat, trap greaseなど(ただし遊離脂肪酸含有率は20%以下)を原料として高品質のBDFを製造可能とするプロセスの開発に力を注いでいる。特に、animal fatやtrap greaseは植物油よりもかなり安価であることから、より多くの利益が見込めるとのことである。

4. 特徴的な点

BDIのBDF製造プロセスでは、40℃、大気圧条件下で、均相アルカリ触媒である水酸化カリウムを用いてエステル交換反応を行っている。Fresh vegetable oilsを原料とするプロセスをSingle-Feedstock Plantと、他にUsed cooking oilやAnimal fatも原料とするプロセスをMulti-Feedstock Plantとしている。そして、前述の目標を達成するためには、Multi-Feedstock Plantが必須であると考えている。製造したBDFの品質を左右する因子は、主に原料油の物理化学的な性質、エステル交換反応、精製過程の3つであり、精製過程が最も重要であるという。つまり、どんな原料油からも高品質なBDFの製造を可能とすることを目指しているため、原料油の前処理とBDFとなるメチルエステルの精製プロセスを重要視している。エステル交換反応に関する技術は既に確立しているという認識であり、エステル交換のための固体触媒の開発が必要とは考えていないようである。これは、固体触媒を用いた場合、Feedstock flexibilityが減少するためであろう。

均相触媒を用いているため、当然のことながら副成グリセリンにアルカリが混入しているが、これは、プラント発注者の希望に従い、そのまま焼却、純度80%程度まで精製、医薬品グレードである純

度 99.7%まで精製など、様々な対応をしているとのこと。しかし、医薬品グレードのグリセリンを製造しても、原料が廃油である場合、日本と同様に化粧品や食品への利用は難しいらしい。BDF 製造プラントの経済性を考えると、このグリセリンの販売も重要であるが、BDF 製造量の増加に伴いグリセリンの価格が低下していることが問題となっている。また、グリセリンの精製課程で生じるカリウム塩から固体化学肥料を製造する技術も有している。

5. その他討議で分かったこと

オーストリアの石油系ディーゼル燃料の販売コストは約 1.0 ユーロ/L、BDF ブレンド燃料のコストは約 0.9 ユーロ/L とのこと。これに対して、製造規模が 6,000 to/y のプラントのオペレーションコストは 0.10-0.15 ユーロ/L、原料コストは植物油で 0.40-0.50 ユーロ/L、動物油で 0.20-0.25 ユーロ/L とのこと。オペレーションコストの易さに驚いた。

今後の重要な研究課題は、ヨーロッパで使用するディーゼル燃料を全て B5 とするためには、原料油が足りないことから、この原料油を確保することであると考えている。その一方策として、動物油やその廃油、重油を原料として利用できる製造プロセスを構築することを目指している。動物油を用いた場合、狂牛病の原因となるプリオンタンパク質などの汚染物質が混入している恐れがあるため、このようなタンパク質をどのように燃料中から除去するのかなどを問題視している。

6. 類似の研究を行っている日本の組織

日本で最も大きなバイオディーゼル燃料製造プラントは、京都市の日立造船(株)製のものであり、約 5,000 to/y である。このプラントでは、均相アルカリ触媒である KOH が用いられている。均相アルカリ触媒を用いる場合、原料油中に含まれる遊離脂肪酸がアルカリとケン化を生じて石鹸を生成し、BDF の収率を低下させる。従って、この反応の影響が無視できると言われる遊離脂肪酸含有量 0.5 %以下まで減じる原料油の前処理を行う必要がある。日立造船(株)のプラントでは、この前処理によるコスト付加を避けるため、一般家庭から排出される酸化の進んだ廃食用油(遊離脂肪酸含有量が高い)と、飲食店やホテルから購入した酸化の進んでいない廃食用油とを混合することによって原料油の脂肪酸含有量を低く抑えている。そのため、前処理はフィルター濾過と脱水のみである。そして、60 で2段のエステル交換反応を行った後、未反応メタノールを減圧蒸留で回収、BDF 相とグリセリン相を比重差分離後、BDF 相を水洗浄することによって、京都スタンダードと言われる高品質のバイオディーゼル燃料を製造している。副成するアルカリ混入グリセリンに関してはコスト付加を避けるため、焼却処理している。この製造プラントでは、原料コストが廃食用油に 30 円/L、BDF 加工費に 8.5 円/L、その他にオペレーティングコストが加わるため、BDI の製造プラントに比べて経済性は低いものであろう。これは、製造規模の違いやオペレーティングコストの違いが大きいと考えられる。

日本では、原料となる油が少ないため、経済性が高い大規模プラントの建設が難しいと考えられる。そのため、原料油の前処理やBDFの精製プロセスに要するコストの削減を目的としたBDF製造用の新規な固体触媒の開発に関する研究が盛んである。これらの研究面ではヨーロッパよりも優れた成果を挙げていると考えられる。

2.5 Renewable Resources, Institute of Chemistry, University of Graz

<http://www.kfunigraz.ac.at/>

坂 志朗(京都大学)

DATE : 17 March, 2006

PLACE : Renewable Resources, Institute of Chemistry, Karl-Franzens-University
Heinrichstrasse 28, 8010 Graz, Austria

MEMBER: Prof. Martin Mittelbach(研究員および大学院生計 3 名)

-Visitors (G-TeC): 京都大学 坂 志朗

東北大学 北川 尚美

東京工業大学 平井 秀一郎

JST 科学技術連携施策群支援業務室 鈴木 隆幸

面談概要

1) University of Graz の概要

University of Graz は 400 年以上の歴史のあるオーストリアで 2 番目に古い大学である。また、Graz 市は人口 25 万人のオーストリア第 2 の都市で、学生数は 45,000 人に及ぶ。

バイオディーゼルについても 1982 年に世界に先駆けてバイオディーゼル(BDF)の製造、エンジンテストを行い、世界をリードしてきたが、BDF の研究開発の分野で常に指導的立場にあったのが今回面談した Prof. M. Mittelbach である。

2) ヨーロッパにおけるバイオディーゼルの現状

全世界のバイオディーゼル燃料の約 9 割がドイツ、フランス、イタリアを始めとする EU 諸国で生産されており、そのきっかけは、農業の育成政策の一環としての遊休農地利活用、大気汚染防止、石油依存度の低減、エネルギー供給保障などにあり、EU 各国が税の優遇措置の導入などにより育成してきた。

ヨーロッパの中で最も早くバイオディーゼル(BDF)に注目し、その燃料ポテンシャルを検討してきたのはオーストリアであり、1982 年に菜種油の脂肪酸メチルエステルによるエンジンテストがスタートした。その後、パイロットプラントが 1985 年に完成、1991 年には世界で最初の BDF の品質規格ができ上がった。これをもとに、EU 統一 BDF 品質規格が 2004 年にでき上がり、現在に至っている。

グラーツ市(オーストリア)では 2005 年、廃油脂からの B-100 を用いた市バス 135 台の運行が実現しており、年間 2,000 トンの油脂利用に達している。

厳しいオーストリアの冬には BDF の低温流動性が悪化するため、外気が -10 にまで低下する場合には流動性向上剤を用いている。また、冬場の BDF 原料には融点の高い飽和脂肪酸の多いパーム油を避け、菜種油などを用いている。

バイオ燃料の利用に対し、B100(100%バイオディーゼル)についてはオーストリアで非課税扱いで税の優遇措置が取られており、軽油(95 ¢ /)に対し、BDF(90 ¢ /)が 5 ~ 10%安価となっている。

3) わが国との比較

EU では 387 万トン/年の BDF の利用に達しているが、我が国では 0.2 万トン/年に過ぎない。この差の大きな原因は、我が国では EU のような BDF の品質規格ができ上がっていないこと、BDF に対する税の優遇措置がとられていないことなどにあり、今後我が国において早急に検討されなければならない課題である。

4) 技術的課題

ドイツやオーストリアでは B100 が利用されてきているが、EU 全体としては B5(軽油に 5%BDF を混合したディーゼル燃料)が今後利用される方向にある。この原料として菜種油が主として用いられているが、今後は BDF の利用量の増加とともに菜種油以外の原料油脂の確保が課題であり、ひまわり油の利用や動物油脂、廃食油の回収・利用がすでに始まっている。さらには、すでにナンヨウアブラギリ(Jatropha curcas)からの油には毒性物質が含有されており、食用に用いられないことから、BDF 原料への利用が注目されている。EU では菜種油は US \$ 900/トン、パーム油は US \$ 400/トンにまで上昇しており、安価に原料を確保することが世界的課題となる傾向にある。

BDF の副産物であるグリセリンの利用分野の確立も課題の一つであるが、化粧品や医薬品、合成樹脂、メタン生産の基質などの利用分野がすでに開拓されている。しかしながら、BSE 問題により、動物油脂からのグリセリンへの警戒が高まっている。さらに、EU で用いられているアルカリ触媒法ではグリセリンとアルカリ触媒との分離精製が困難で、高純度のグリセリン製造に課題がある。

5) バイオ燃料における今後の展望

液体バイオ燃料の利活用に対し、EU では 2005 年までに全燃料に対し 2%、2010 年までに 5.75%の利用目標(バイオ燃料アクションプラン Directive 2003/30/EC)をかかげており、目標実現に向けて各国での液体バイオ燃料の利用に努力がはらわれている。

BDF の利活用と共に、次世代のバイオ燃料としての BTL、その一つとしてのバイオメタノールや DME などの開発が今後の課題である。また、ドイツなどでは脂肪酸メチルエステルに転換することなく、油脂を直接ディーゼル燃料とする研究も進められているが、Prof. Mittelbach は適当でないとの判断であった。

ヨウ素価の高い(不飽和脂肪酸の多い)植物油からの高品位な BDF 製造技術の確立、BDF の熱安定性、酸化安定性および貯蔵安定性などに多くの課題がある。また、動物油脂の BDF への利用技術の確立も今後の大きな課題である。

2.6 Vienna University of Technology (TUWien)

Institute of Chemical Engineering

Gene Technology and Applied Biochemistry Laboratory

<http://www.vt.tuwien.ac.at/>

天野 良彦(信州大学)

DATE : 12:00-17:00 14 March, 2006
PLACE : Vienna University of Technology (TUWien)
Getreidemarkt 9/166-5,A-1060 Wien, Austria
Cristian P. Kubicek, Ph.D./ Professor
MEMBER: 研究室見学: Kurt Messner, Ph.D / Professor /
(Industrial Microbiology and Bioengineering)
信州大学 天野 良彦
-Visitors (G-TeC): 三重大学 粟冠 和郎
JST/CRDS 大矢 克

1. 要旨

大学の研究機関であり、応用面よりはむしろ基礎科学、特に生物の根本的な原理の追求に重きを置いており、この基礎的知見から得られた成果を応用するというスタンスにたって研究を行っている。

バイオマスの生物的な変換においては、酵素のコスト面が問題と考え、主に酵素の生産性の改善に取り組んでいる。特に、糸状菌におけるセルラーゼの誘導、および代謝工学を用いた生産性の向上に特徴がある。しかしながら、アルコール発酵までの研究は、ほとんどやられていない。近年は、セルロース資源ばかりではなく、ついで豊富に存在するキチン質資源の有効利用にも重点的に取り組んでいる。

バイオマスの生物的な変換、特に酵素糖化における酵素生産の観点からは、研究水準は世界レベルにあると考えられる。

2. 組織概要(歴史、背景、特徴、方針/戦略)

2002年に、これまで大学内で独立していた存在していた化学工学(燃料化学および環境工学)、生物工学、応用植物学、食品化学の4つの分野の研究所を統合して新しい化学工学分野の研究所が作られた。この中には7つの分野があるが、Kubicek教授のグループはこの中の遺伝子工学および応用生化学の分野の研究を行っている。また、Messner教授のグループは、工業微生物学、酵素利用および発酵学、バイオエンジニアリング分野の研究を行っている。(現在の組織は<http://www.vt.tuwien.ac.at/>参照)。

バイオマスエネルギーについては、以前は、VTTや酵素メーカーとの共同研究をしていたが、現在は単独で研究を行っている。しかし、応用面の研究はあまり手がけておらず、実用化をふまえた戦略的な研究は行われていない。酵素変換技術は、糸状菌の生産するセルラーゼ系酵素の生産性の改善に主眼をおいているのが特徴である。また、脱リグニン処理では、選択資化性の担子菌を用いる方法および脂質酸化系とリンクした酵素/メディエーター系に特徴がある。

3. 主要な研究テーマ

TUWien の Prof. Kubicek の研究室で開発しているトピックスは以下の4つである。

- 1) 代謝工学を利用した酵素生産性の改良
- 2) セルラーゼの生合成における誘導・転写制御因子の解明
- 3) トリコデルマ属の生物防除に關与するタンパク質に關する研究
- 4) トリコデルマ属の生態学的多様性と系統的分類

このうちバイオエネルギー開発に關連する課題は上記の2つである。

また、Prof. Messner の研究室では、以下のテーマを主に研究している。

- 1) 選択資化性担子菌を用いたリグノセルロース中のリグニンの選択的な除去
- 2) バイオパルピング技術開発
- 3) バイオミメティック脱リグニン法の開発
- 4) 微生物処理による木質の表面改質およびこれを利用したパーティクルボード生産
- 5) ラッカーゼ/脂質酸化系によるリグニン分解

このうち、バイオエネルギー開発に關連する技術は、1, 3, 5である。

4. 特徴的な点

酵素生産に關する特徴は以下の通り

- ・ 酵素生産の安価な炭素源の探索
ラクトースをターゲットに、菌株のガラクトース代謝を解明
代謝経路からソルビトールでの誘導が効果的なことを発見
- ・ セルラーゼ遺伝子の転写制御因子
Ace1, Xyr1, Ace2, Hap2/3/5, Cre1 の5つの制御因子を発見
各成分のプロモーター領域のこれらの制御因子を解析し、タンパク質の生産性を改良

前処理法に關する特徴は以下の通り

- ・ 酵素反応の前処理技術
担子菌を用いて木質中のリグニンを選択的に除去する技術は省エネルギーな方法
有機金属錯体を用いた効率的なバイオミミック脱リグニン法は有効
- ・ 担子菌の選択資化性を利用した脱リグニン法
Ceriporiopsis subvermispora を用いた選択的な脱リグニンは省エネルギーな方法
- ・ バイオミミック脱リグニン法
有機金属錯体と有機過酸化物をを用いたリグニン分解酵素をミミックした脱リグニン法に特徴：特に細胞間層のリグニンを完全に除去
ただし、用いる試薬が高価であることが難点
- ・ ラッカーゼ/脂質酸化系によるリグニン分解
Laccase/HBA/Mn²⁺系での脂質の酸化を通して脱リグニンを行うシステムが特徴

以上のように、バイオマスからのバイオエタノール生産において重要となる酵素変換技術において、前処理法および酵素生産技術についての基礎的な研究は世界でもトップレベルと考えられる。しかしながら、基礎的研究を実用化技術とする戦略にかけている。今後、応用面を他の機関と組んで発展させ

ると有望であろう。

5. その他討議で分かったこと

セルロース資源について多く存在するバイオマス資源であるキチンの利用についての取り組みがなされており、糸状菌の生産する酵素系は強力であり、今後の研究が注目される。バイオ燃料というよりは、むしろファインケミカルとして有用。

バイオマス利用とは関係ない話題であるが、糸状菌 *Trichoderma* 属の菌は、植物病原菌の生物防除剤として非常に有効。これは、ファイトアレキシンを誘導するタンパク質を生産すること、および多様なキチナーゼを生産し、これば病原菌の細胞壁溶解に関与していることが原因。

トリコデルマ属の生態学的多様性と系統的分類について、以下のサイトを運営している。

http://isth.info/tools/blast/show_all_seq.php

6. 類似の研究を行っている日本の組織

糸状菌セルラーゼの誘導機構については、長岡技科大の森川教授が研究を行なっている。Kubicek 教授と非常に近い研究であり、安価で高力価の酵素剤開発において注目される。

セルラーゼの生産においては、最近では産業技術総合研究所の石川研究員や海洋研究機構などで耐熱性の酵素の開発がされてきており、高温でのセルロース分解は非常に有望である。また、これらと従来からあるセルラーゼ製剤との組み合わせについても、生物変換処理の有効性に期待が持たれる。

セルロース系バイオマスの酵素変換の前処理技術に関しては各種の取り組みがなされているが、生物的にリグリンを除去する方法は、京都大学の渡辺教授のグループが行っている。渡辺教授は Messner 教授とも共同研究を行っており、省エネルギー変換技術として有望である。

2.7 Institute of Structural Biology and Microbiology, CNRS (IBSM-CNRS)

<http://www.cnrs.fr/index.html>, <http://bip.cnrs-mrs.fr/Plan.html>

栗冠 和郎(三重大学)

DATE : 9:30-12:00 16 March, 2006

PLACE : Unité de Bioénergétique et d'Ingénierie des Protéines, Institut de Biologie Structurale et Microbiologie, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)
31 Chemin Joseph Aiguier 13402 Marseille Cedex, France

MEMBER: Jean-Pierre Bélaïch, Ph.D./Professor
Chantal Tardif, Ph.D./Professor
Henri-Pierre Fiérobe, Ph. D./Permanent Researcher

-Visitors (G-TeC):三重大学 栗冠 和郎

信州大学 天野 良彦

JST/CRDS 大矢 克

1. 要旨

嫌気性細菌の形成するセルロース分解システム、特にセルラーゼ複合体(セルロソーム)の形成機構、個々のセルロソーム成分および複合体の立体構造、セルロソームにおける酵素活性の相乗作用、人工セルロソームの構築、遺伝子発現調節機構などについて現在の到達点と研究・解析技術について討議を行った。

リグノセルロースの酵素分解に関する研究については、*Trichoderma reesei* などの糸状菌を用いた例が多いが、タンパク質量あたりのセルロース分解活性(比活性)はセルロソームの方が高いと認識しており、セルロソームの分子生物学・バイオテクノロジーについて、応用を目指した基礎研究を行っている。セルロソーム研究の水準は間違いなく世界最高レベルにある。

2. 組織概要(歴史、背景、特徴、方針/戦略)

CNRS は、1939年にフランス政府により設立された機関であり、基礎的および応用的研究、研究のための技術教育訓練の支援等を目的としており、科学知識の発展を通してのフランス語の普及も目的の中に入っている。ヨーロッパ最大の規模を持つ研究機関であり、その研究分野は広く、生命科学の他、数学、物理学、化学、核・高エネルギー物理学、工学、IT、環境科学、社会科学に及ぶ。研究所はフランス各地にあるが、研究室の運営は、CNRS のみの財源による CNRS-only labs と大学や他の研究機関、あるいは企業との共同運営による Joint labs に分けられる。研究室は4年契約で運営され、年2回の評価があり、契約の更新は可能である。学際領域の知識、技術の発展、複雑な社会問題の解決のために、多くの学際プログラムが組まれており、その中に環境、エネルギー、持続可能な発展のプログラムも含まれている。予算は政府など公的なものに加え、CNRS からのものがある。後者は、企業および EU からの資金や特許使用料などに由来する。今回の調査訪問先はマルセイユにある構造生物学・微生物学研究所のバイオエネルギー・タンパク質工学研究室であった。Jean-Pierre Bélaïch 教授らの研究グループは、1980年代より中温性嫌気性細菌 *Clostridium cellulolyticum* のセルロソームに着目し、とその構成

成分の構造と機能に関する研究を基礎的な面を中心に進めている

(嫌気性細菌の生化学および分子遺伝学グループの Web サイト

<http://bip.cnrs-mrs.fr/bip00/bip03.html> 参照)。

J.-P. Bélaich 教授と C. Tardif 教授は Provence 大学に属する非 CNRS の研究員であり、H.-P. Fiérobe 博士は非 CNRS の研究員である。CNRS にある研究室には大学院生以上が所属して、研究と教育が行われている。

3. 主要な研究テーマ

Clostridium cellulolyticum のセルロソームの形成機構の解明を中心とする構造と機能の研究とタンパク質工学的手法によるセルロソームの高機能化を目指した研究を遺伝子レベル、タンパク質レベル、微生物レベルで行っている。主要テーマは次のようなものである。

- ・セルロソームの構成成分の同定・セルラーゼ遺伝子クローニングと異種宿主による発現と遺伝子産物の特性解析
- ・ハイブリッドセルロソームを利用したセルロソームの機能解析と高機能化
- ・*Clostridium cellulolyticum* の宿主・ベクター系を利用した *in vivo* におけるセルロソームの機能解析

4. 特徴的な点

糸状菌セルラーゼ系より分解の比活性が高いと言われる嫌気性細菌のセルロソーム(セルラーゼ複合体)をバイオマス分解に用いることを目指しており、セルロソームの構造と機能の解明を中心に基礎的な研究を行っている点に特徴がある。国際的な共同研究も行っている。次のような最近の研究成果がある。

- ・*Clostridium cellulolyticum* の宿主・ベクター系を開発することにより、アンチセンス手法や相同的組換えの使用、さらに挿入配列(IS)による突然変異株の取得が可能になった。この手法を用いてセルロソームの中核となる骨格タンパク質やセルラーゼ成分の個々の重要性を明らかにした。
- ・ゲノム中に存在するセルラーゼ遺伝子クラスターの転写制御について検討し、クラスター中の遺伝子全てが等しく転写されるわけではなく、骨格タンパク質遺伝子などクラスターの上流域に存在する遺伝子が強く発現することを見いだしている。この結果は、セルロソーム中のタンパク質成分の分析と一致していた。
- ・マンナーゼK遺伝子の *Clostridium cellulolyticum* 中での高発現はセルロソーム中の構成成分を変え、酵素活性の強さに影響を与えた。この結果は、セルロソーム中の構成成分の存在比は、生産される酵素量に依存し、骨格タンパク質と他の成分との親和性の違いによるものではないことを示した。
- ・骨格タンパク質とセルラーゼ成分の結合の特異性は、微生物により異なっており、この種特異性を利用してハイブリッドセルロソームを構築した。セルラーゼ成分の組み合わせおよびその並び順を変え酵素活性に及ぼす影響を調べた。
- ・セルロソームの数種の構成成分の立体構造をX線解析により明らかにしている。また、複合体(ミニセルロソーム)としての形を小角X線散乱法により解析した。

5. その他討議で分かったこと

数年前までは、CNRS においてもバイオマスの酵素分解の研究では研究費を取りにくかったが、最近では改善している。

国際的な共同研究を間に行っている。イスラエルの *Clostridium thermocellum* の研究者とは以前からであるが、VTT(フィンランド)の M. Penttilä らとは、*Trichoderma reesei* のセルラーゼのセルロソーム化の研究を行っている。また、*Clostridium cellulolyticum* のゲノム解析を米国 DOE JGI で行っている。

現段階では、*Clostridium cellulolyticum* を用いてバイオマスを分解して直接発酵産物を得ることは考えていない。バイオエタノールを生産させるためにはアルコール耐性の強い株の取得が必要であろう。しかし、長期的にはセルロソームの研究は重要である。

6. 類似の研究を行っている日本の組織

Clostridium thermocellum および *Clostridium josui* のセルロソームの研究は三重大学・粟冠が行っている。両菌株からのセルラーゼ遺伝子の単離と発現やセルロソーム形成機構の解析等が行われている。

(財)地球環境産業技術研究機構(RITE)ではこれまで、カリフォルニア大学 Davis 校の R. H. Doi 教授の研究室に研究費を提供することにより *Clostridium cellulosvorans* のセルロソームの研究を行ってきた。今後、研究の主体を RITE に移すとの情報を得ているが詳細は不明。また、独立行政法人国際農林水産業研究センター(JIRCAS)において、好熱菌を用いたバイオエタノール研究が開始されている。

G-TeC レポート

「第三世代バイオマス技術の 日米欧研究開発」

独立行政法人 化学技術振興機構 研究開発戦略センター
井上グループ

〒102-0084 東京都千代田区二番町3番地
麹町スクエア3階

電話 03-5214-7485

ファクス 03-5214-7385

<http://crds.jst.go.jp/>

平成18年5月

Copy right 2006 CRDS/JST

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。
