

アジアバイオマスハンドブック

ーバイオマス利活用の手引ー

「平成 19 年度アジア環境保全型農業パートナーシップ構築支援事業（農林水産省委託事業）」

社団法人 日本エネルギー学会

このハンドブックは、農林水産省の受託事業として、アジア・バイオマス協議会の協力を得て作成したものである。

序文

この度バイオマスハンドブックのアジア版を出版することができたことは、大変に喜ばしくまた光栄である。2002年にはバイオマスハンドブックの日本語版を、60名余のこの分野の専門家の協力により発行することが出来た。今回はわが国の専門家に加えてアジア諸国の専門家の協力を得て、英文によるアジア版の出版に至ることが出来た。

既に承知の通り、地球温暖化現象は顕在化しており、石炭、石油、天然ガスを消費し続ける限り、これらの化石燃料の燃焼によって排出される二酸化炭素は大気中に蓄積していく。一方で、化石燃料の寿命は有限であることは明らかで、確認可採埋蔵量を生産量で除した可採年数は石油、石炭、天然ガスがそれぞれ41年、160年、65年とされている。私どもは化石燃料から脱却すべき新しい時代の入り口にきており、バイオマスが新たな展望を切り開く重要な鍵であると確信する。

バイオマスは、一般的にはエネルギーやマテリアルという形で利用できる生物由来の一定量の資源を意味する。木質系、草本系、海藻、微細藻類、農業残渣、森林残渣、都市廃棄物などがバイオマスという範疇に入る。現段階ではまだ商業規模ではないが、資源作物は大規模になるとエネルギープランテーションとして有望である。

地球温暖化の元凶である二酸化炭素の排出を抑制するための一つの強力な武器は、再生可能エネルギーの導入にある。再生可能エネルギーにはバイオマス、太陽光、地熱、風力、水力、潮力、波力などがある。バイオマスは他の再生可能エネルギーとどう違うのであろうか。

バイオマスは太陽エネルギーを利用し、水と大気中の二酸化炭素の光合成によりみずからの組織を形成する。従って、最終的に燃焼されて大気中に二酸化炭素として放出されても、同量の二酸化炭素を再び光合成により固定すれば、正味の大気中の二酸化炭素濃度に変化はない。これをバイオマスの「カーボンニュートラル性」と称している。

従って、二酸化炭素の固定、エネルギー利用、二酸化炭素の放出という循環システムから化石資源に代替できるバイオマスエネルギーが取り出せる。この分だけ化石資源の利用が抑制され、結果的に二酸化炭素を削減されたことになる。バイオマスは再生可能エネルギーの中でも、唯一の有機性すなわち炭素質のエネルギー源である。言い換えれば、バイオマスからのみエタノール、メタノール、ディメチルエーテル、炭化水素などのケミカルや燃料が作られる。このことは、バイオマスが炭素質であること、輸送や貯蔵が可能であることと同意義である。風力エネルギー、太陽光エネルギー、潮力エネルギー、波力エネルギー、地熱エネルギーなどは電気や熱は作り出せても、有機物は原理的に作り出すことはできない。しかし、バイオマスは再生可能ではあっても、エネルギーとして一方的に利用するだけでは化石資源の利用と同じであり、再植林などをしなければ大気中に蓄積されることになる。バイオマスからの長期かつ安定的なエネルギー供給のためには、持続的な森林管理が極めて重要になる。

本書はバイオマスの性質や賦存量、熱化学的変換技術や生物化学的変換技術の紹介、持続的社会システムなど広範囲な側面を扱っている。しかし、最大の特徴はアジア諸国、すなわちブルネイ、カンボジア、中国、インド、インドネシア、韓国、マレーシア、ミャンマー、フィリピン、シンガポール、タイ、ベトナムの専門家によって各国のバイオマス利用状況が解説されていることである。

2008年1月
編集委員長 横山伸也

アジアバイオマスハンドブック編集委員会

編集委員長

横山 伸也 東京大学大学院

編集幹事

松村 幸彦 広島大学大学院

編集委員

安藤 象太郎 独立行政法人 農研機構 畜産草地研究所
坂西 欣也 独立行政法人 産業技術総合研究所
佐野 寛 地球エネルギーシステム研究所
美濃輪 智朗 独立行政法人 産業技術総合研究所
山本 博巳 財団法人 電力中央研究所
吉岡 拓如 日本大学

アドバイザー・ボード

木谷 収 日本大学大学院
坂 志朗 京都大学大学院
白井 義人 九州工業大学
山地 憲治 東京大学大学院

執筆者 (五十音順)

阿部 俊美 中国電力株式会社
天野 正博 早稲田大学
新井 喜明 株式会社 明電舎
安藤 象太郎 独立行政法人 農研機構 畜産草地研究所
小木 知子 独立行政法人 産業技術総合研究所
長田 隆 独立行政法人 農研機構 北海道農業研究センター
上出 光志 北海道立工業試験場
川元 スミレ 独立行政法人 森林総合研究所
木谷 収 日本大学大学院
蔡 義民 独立行政法人 農研機構 畜産草地研究所
斉木 隆 社団法人 アルコール協会
坂 志朗 京都大学大学院
坂井 正康 長崎総合科学大学
佐野 寛 地球エネルギーシステム研究所
澤山 茂樹 独立行政法人 産業技術総合研究所
白井 義人 九州工業大学
鈴木 勉 北見工業大学
関口 静雄 ライオン株式会社
高橋 正征 高知大学大学院
外崎 真理雄 独立行政法人 森林総合研究所
泊 みゆき NPO 法人 バイオマス産業社会ネットワーク
中川 仁 独立行政法人 農業生物資源研究所

中俣 恵一	北越製紙株式会社
羽田 謙一郎	みずほ情報総研株式会社
平田 悟史	川崎重工業株式会社
福井 久智	鹿島建設株式会社
藤井 重雄	株式会社 タクマ
藤野 純一	独立行政法人 国立環境研究所
松藤 敏彦	北海道大学
松村 幸彦	広島大学大学院
三浦 正勝	独立行政法人 産業技術総合研究所
美濃輪 智朗	独立行政法人 産業技術総合研究所
柳下 立夫	独立行政法人 産業技術総合研究所
八木田 浩史	日本工業大学
山本 和貴	独立行政法人 農研機構 食品総合研究所
山本 晋	岡山大学大学院
山本 博巳	財団法人 電力中央研究所
横山 伸也	東京大学大学院
吉岡 拓如	日本大学

執筆者 (海外)

Chollacoop, Nuwong	National Metal and Materials Technology Center, NSTDA, Thailand
Elauria, Jessie Cansanay	University of the Philippines Los Banos, Philippines
Lee, Tin-Suk	Korea Institute of Energy Research, Korea
Liang, David Tee	Nanyang Technological University Innovation Center, Singapore
Liu, Dehua	Tsinghua University, China
Malaykham, Bouathep	Ministry of Energy and Mines, Laos
Man, Trai Dinh	Institute of Biotechnology, VAST, Vietnam
Mohamad, Ali Hassan	University Putra, Malaysia
Nivitchanyong, Siriluck	National Metal and Materials Technology Center, NSTDA, Thailand
Panaka, Petrum	PT Gikoko Kogyo, Indonesia
Shiau, Tzay-An	National Taiwan Ocean University, Taipei Chinese
Sovanna, Toch	Ministry of Industry Mines and Energy, Cambodia
Topaiboul, Subongkoj	National Metal and Materials Technology Center, NSTDA, Thailand

目 次

第1部 バイオマス利用の利点	1
1.1 バイオマスの利点	1
1.1.1 バイオマスとは何か?	1
1.2 バイオマスの特性	3
1.2.1 総論	3
1.2.2 再生可能性	3
1.2.3 炭素中立性	4
1.2.4 持続可能な農業	4
1.3 バイオマスの利用法	5
1.3.1 総論	5
1.3.2 変換と利用	7
1.4 バイオマス利用の利点	8
1.4.1 総論	8
1.4.2 石油資源の枯渇	9
1.4.3 地球温暖化	9
1.4.4 生活の質の向上	10
1.4.5 農民の収入の増加	10
1.4.6 エネルギーセキュリティ	10
1.4.7 外貨獲得	11
第2部 バイオマス資源	12
2.1 バイオマスの分類	12
2.1.1 バイオマスの定義	12
2.1.2 法律上のバイオマス(エネルギー)の定義	12
2.1.3 バイオマスエネルギーの特徴	13
2.1.4 バイオマスの分類	13
2.1.5 バイオマス分類の一例(利用、用途の観点からの分類)	13
2.2 資源量の概算	15
2.2.1 廃棄物系バイオマスの資源量の推算	16
2.3 バイオマスの組成	21
2.3.1 バイオマスの組成の概要	21
2.3.2 代表的な組成成分	21
2.3.3 代表的なバイオマスの組成分析例	22
2.4 バイオマスの含有エネルギー量	24
2.4.1 バイオマスのエネルギー量の指標	24
2.4.2 各種バイオマスの発熱量	25
2.4.3 計算式による発熱量の推算法	27
2.5 炭素循環	28
2.5.1 地球上の炭素収支	28
2.5.2 森林生態系における炭素循環	29

2.5.3 炭素収支モデル	30
2.6 木質系バイオマス	31
2.6.1 木質系バイオマスの種類と特徴	31
2.6.2 成長速度	32
2.6.3 実用例と現在の使用量	34
2.6.4 バイオマス資源量	34
2.7 草本系バイオマス	35
2.7.1 草本系バイオマスとは	35
2.7.2 C ₃ 植物とC ₄ 植物	36
2.7.3 草本系バイオマスの資源量	37
2.7.4 スイッチグラス	38
2.8 澱粉・糖生産型作物	41
2.8.1 澱粉・糖生産型作物の概説	41
2.8.2 キャッサバ	42
2.8.3 サトウキビ	44
2.9 油生産型バイオマス	46
2.9.1 油生産型バイオマスとは	46
2.9.2 油脂の製法	46
2.9.3 油生産型バイオマスの資源量	47
2.9.4 バイオディーゼル	47
2.9.5 アブラヤシ	47
2.9.6 ココナツ	48
2.9.7 ジャトロファ	51
2.10 水生植物バイオマス	53
2.10.1 水生植物バイオマスとは	53
2.10.2 生産速度	53
2.10.3 実用例と現在の使用量	54
2.10.4 バイオマス資源量	56
2.11 農産残渣	56
2.11.1 農産残渣の種類と特徴	57
2.11.2 発生量	57
2.11.3 世界のバイオマスエネルギーポテンシャル	58
2.12 木質系残廃材	59
2.12.1 環境的意義と特徴	59
2.12.2 木材工業残廃材	59
2.12.3 木材利用系残廃材	61
2.12.4 エネルギー利用手法	62
2.13 畜産廃棄物	62
2.13.1 畜産廃棄物とは	62
2.13.2 畜産廃棄物の特徴	63
2.13.3 畜産廃棄物の発生量	63
2.13.4 畜産廃棄物の実用例と現在の使用量	64

2.13.5 日本と世界の資源量	65
2.14 下水汚泥	66
2.14.1 下水汚泥とは	66
2.14.2 下水汚泥の種類と特徴	66
2.14.3 下水汚泥の有効利用	67
2.15 都市ごみ	68
2.15.1 埋立地からのメタンガス回収	68
2.15.2 バイオガス化	69
2.15.3 ごみ発電	69
2.15.4 RDF 発電	70
2.15.5 熱分解による炭化・ガス化	71
2.16 黒液	72
2.16.1 黒液とは	72
2.16.2 黒液発生のプロセス	72
2.16.3 黒液の特徴と意義	74
2.17 食品加工廃棄物	75
2.17.1 食品加工廃棄物の潜在性	75
2.17.2 バガス	76
2.17.3 トウモロコシの穂軸	78
2.17.4 糖蜜	79
第3部 バイオマスの物理的変換	81
3.1 薪生産	81
3.1.1 総論	81
3.1.2 薪の供給	82
3.1.3 薪の利用	83
3.2 ペレタイジング	84
3.2.1 ペレットとペレタイジングとは	84
3.2.2 ペレットと CCB の特徴	87
3.2.3 ブリケット製造のための基礎試験	87
3.2.4 エネルギー効率	88
3.3 パーティクルボード	89
3.3.1 パーティクルボードとは	89
3.3.2 パーティクルボードの生産と消費	89
3.3.3 パーティクルボードの製造	89
3.3.4 マテリアルリサイクルのためのパーティクルボード利用	90
3.3.5 木質パネルを含む木質バイオマスの統計	91
3.3.6 アジアにおける実用化技術	91
第4部 バイオマスの熱化学的変換	93
4.1 燃焼	93
4.1.1 総論	93
4.1.2 コージェネレーション	95
4.1.3 混焼	96

4.2 ガス化	99
4.2.1 ガス化とは	99
4.2.2 ガス化法の分類	99
4.2.3 ガス化に関するバイオマスの物性調査	99
4.2.4 ガス化剤	100
4.2.5 バイオマスのガス化に関する基本現象	100
4.2.6 ガス化生成ガスの特徴	101
4.2.7 ガス化の装置の実施例	101
4.3 熱分解	102
4.3.1 熱分解とは	102
4.3.2 熱分解・急速熱分解の特徴	103
4.3.3 急速熱分解装置	103
4.3.4 生成物の特徴	104
4.3.5 技術の現状	105
4.4 炭化	105
4.4.1 炭化とは	105
4.4.2 炭化の特徴	106
4.4.3 炭化の反応	106
4.4.4 炭化のエネルギー効率	107
4.4.5 炭化生成物	107
4.4.6 技術の現状	108
4.5 水熱ガス化	108
4.5.1 水熱ガス化とは	108
4.5.2 水熱ガス化の特徴	109
4.5.3 水熱ガス化の反応	109
4.5.4 水熱ガス化のエネルギー効率	110
4.5.5 水熱ガス化の生成ガス	110
4.5.6 技術の現状	110
4.6 水熱液化	111
4.6.1 水熱液化とは	111
4.6.2 水熱液化の特徴	111
4.6.3 水熱液化の反応	112
4.6.4 水熱液化の生成油	112
4.6.5 水熱液化のエネルギー効率	113
4.6.6 技術の現状	113
4.7 バイオディーゼル製造	114
4.7.1 バイオディーゼルとは	114
4.7.2 バイオディーゼル燃料の特徴	114
4.7.3 バイオディーゼル製造の反応	114
4.7.4 バイオディーゼル燃料のエネルギー効率	116
4.7.5 技術の現状	116

第5部 バイオマスの生物化学的変換	117
5.1 メタン発酵	117
5.1.1 メタン発酵とは	117
5.1.2 メタン発酵の特徴	117
5.1.3 メタン発酵の原理	117
5.1.4 メタン発酵の現状	119
5.2 エタノール発酵	120
5.2.1 エタノール発酵とは	120
5.2.2 糖質原料のエタノール発酵	121
5.2.3 デンプン質原料のエタノール発酵	122
5.2.4 リグノセルロースのエタノール発酵	124
5.3 アセトン・ブタノール発酵	126
5.3.1 アセトン・ブタノール発酵とは	126
5.3.2 アセトン・ブタノール発酵の特徴	126
5.3.3 アセトン・ブタノール発酵の反応	126
5.3.4 アセトン・ブタノール発酵の効率	127
5.3.5 生成物の利用	127
5.4 水素発酵	129
5.4.1 水素発酵とは	129
5.4.2 水素発酵の特徴	129
5.4.3 水素発酵の反応	129
5.4.4 水素発酵のエネルギー効率	130
5.4.5 生成水素の利用	131
5.5 乳酸発酵	131
5.5.1 乳酸発酵とは	132
5.5.2 乳酸菌について	132
5.5.3 乳酸発酵原料としてのバイオマス	132
5.5.4 パームオイル産業の未利用バイオマスの利用	133
5.5.5 食品ごみからの乳酸発酵	133
5.5.6 乳酸の精製	134
5.6 サイレージ	135
5.6.1 サイレージとは	135
5.6.2 サイレージ調製	135
5.6.3 サイレージ発酵	136
5.6.4 ロールベールサイレージ	136
5.6.5 技術の現状	137
5.7 コンポスト化	138
5.7.1 コンポストの定義	138
5.7.2 コンポスト化の原理	138
5.7.3 コンポスト化の基本構成	138
5.7.4 コンポスト化技術の現状	139

第6部 持続するためのシステム開発	141
6.1 LCAの基礎	141
6.1.1 ライフサイクルアセスメントとは	141
6.1.2 目的と調査範囲の設定	141
6.1.3 インベントリ分析 (LCI)	142
6.1.4 影響評価	143
6.1.5 解釈	145
6.2 エネルギー効率	145
6.2.1 バイオマスの育成、収穫にかかるエネルギー	145
6.2.2 バイオマスエネルギー変換技術の前処理にかかるエネルギー	147
6.2.3 バイオマスエネルギーと化石燃料のエネルギー効率の比較	147
6.3 CO ₂ 排出と環境影響	149
6.3.1 バイオマスのCO ₂ 排出量	149
6.3.2 バイオマス発電と他の発電の比較	150
6.3.3 バイオマスの環境影響	152
6.4 バイオエネルギーの経済性評価	153
6.4.1 バイオエネルギーのコストとは	153
6.4.2 バイオマス資源のコスト	153
6.4.3 バイオマス利用技術のコスト	154
6.4.4 バイオエネルギーの利用コスト	155
6.5 その他の評価	156
6.5.1 生活の質	156
6.5.2 農民の収入	157
6.5.3 エネルギーセキュリティと外貨獲得	158
6.6 持続性のためのシステム開発	159
6.6.1 生物多様性 (パームオイルを例として)	159
6.6.2 土地利用競合	161
6.7 エネルギーモデル	162
6.7.1 エネルギーモデルとは	162
6.7.2 代表的なエネルギーモデル	162
6.7.3 DNE21 モデル	163
6.7.4 GLUE モデル	163
6.7.5 GLUE モデルにおける土地利用競合の扱い	163
第7部 アジア諸国の現状	165
7.1 中華人民共和国	165
7.2 大韓民国	167
7.3 ミャンマー	170
7.4 ラオス	172
7.5 ブルネイ	174
7.6 インドネシア	177
7.7 カンボジア	181
7.8 マレーシア	183

7.9	フィリピン	188
7.10	シンガポール	190
7.11	タイ	192
7.12	ベトナム	195
7.13	日本	196
7.14	台湾	199
第8部	バイオマス利用例	201
8.1	小規模バイオメタン化	201
8.1.1	バイオメタンおよびバイオメタン化とは	201
8.1.2	中国でのバイオメタンの状況	201
8.1.3	小規模バイオメタン化の特性	202
8.1.4	小規模バイオメタン化のプロセス	202
8.1.5	小規模バイオメタン化のエネルギー供給	203
8.2	大規模メタン発酵施設	203
8.2.1	大規模メタン発酵施設の概要	203
8.2.2	大規模メタン発酵施設の処理フローと各設備の説明	203
8.2.3	大規模メタン発酵施設の事例	205
8.3	ジャトロファ栽培	207
8.3.1	ジャトロファの耕作	207
8.3.2	繁殖法	208
8.3.3	ジャトロファバイオディーゼル	208
8.4	籾殻による発電	211
8.4.1	タイにおける発電の促進	211
8.4.2	タイのバイオマス発電所	211
8.4.3	籾殻のガス化技術	212
8.5	エタノールの生産	213
8.5.1	エタノール生産の原料に何が適しているか	213
8.5.2	タイにおけるエタノール生産用リグノセルロース系バイオマス原料	213
8.5.3	処理に関するパイオニア的な研究開発	214
付録		217
付録1	東京宣言	219
付録2	京都議定書	235
付録3	アジアの統計	282
付録4	単位	283
付録5	原子量	299
付録6	熱力学的特性	304
付録7	化石燃料の発熱量と可採年数	308
付録8	APECの枠組み	309
付録9	各国の目標	310
付録10	バイオマス関連の歴史	312
付録11	各国語の辞典	313
付録12	関連書籍	314

第1部 バイオマス利用の利点

1.1 バイオマスの利点

1.1.1 バイオマスとは何か？

バイオマス (Biomass) とは一般に、光合成により直接的あるいは間接的に生産され、エネルギーあるいはマテリアル利用が可能である一定量集積した生物起源の資源を意味する。間接的という意味は、畜産業や食品工業から排出される資源を指す。バイオマスには何十万種という植物、すなわち陸生植物や水生植物、農業系残渣、森林系残渣、産業廃棄物、下水汚泥や動物の排泄物が含まれる。現時点では商業規模では行われていないが、エネルギー作物は大規模なエネルギープラントーションを可能にする有望なバイオマスの一つである。具体的には、スギやカラマツなどの木材、ネピアグラス、菜種、ホテイアオイ、ジャイアントケルプ、クロレラ、オガクズ、木材チップ、イナワラ、モミガラ、野菜クズ、食品加工残渣、下水汚泥、パルプスラッジ、家畜糞尿などがある。プラントーション型バイオマスには、ユーカリやハイブリッドポプラ、パームヤシのような木本系バイオマス、サトウキビやスイッチグラスのような草本系バイオマスなどが該当する。分類については2. (1)で詳述する。

オックスフォード英語大辞典 (Oxford English Dictionary) によれば、バイオマスという言葉が文献に初めて現れたのは1934年である。海洋生物協会誌 (Journal of Marine Biology Association) という論文誌の中で、ボゴロフというロシアの学者が学術用語としてバイオマスという言葉を使った。これによれば、学術用語で *Calanus finmarchicus* という動物性プランクトンの季節毎の成長の変化を調べるために、採取したプランクトンを乾燥して重量を測定した。この動物性プランクトンをバイオマスと呼んだのが最初である。

バイオマスは再生可能資源であり、バイオマスから得られるエネルギーは再生可能エネルギーとされているが、わが国では新エネルギーと称されている。これはわが国独特の解釈で法律用語ともいえる。新エネ促進法は、正式には「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」と呼ばれ1997年4月に施行された。バイオマスはこの段階では新エネルギーとして認知されていなかったが、2002年1月の制令改正に伴いバイオマスが新エネルギーとして認知された。

新エネルギーには太陽光発電、風力発電、燃料電池、廃棄物発電、廃棄物熱利用、バイオマス発電が含まれている。法的には、新エネルギーとは石油代替の製造、発生、利用であること、経済性の面での制約から普及が十分でないもの、促進を図ることが特に必要なものとして法令で定めるものと規定されている。したがって、化石燃料である天然ガスや石油を使った燃料電池も上の規定により新エネルギーであり、バイオマスの熱利用は古くから行われているが新エネルギーとして規定されている。外国では、バイオマスエネルギーはバイオエネルギーと呼ばれるのが普通であり、再生可能エネルギー（Renewable energy）の一員として位置づけられている。

多くの研究によれば、今後数 10 年にわたり化石燃料の価格が高騰していくにつれて、バイオマスエネルギーは全体のエネルギー供給の中で大きな割合を占めていくと予想されている。バイオマスは、エネルギー源としてのバイオマスは大きな魅力がある。なぜならば、CO₂ 排出が正味ゼロであるということから、温室効果ガス排出には寄与しないからである。これをバイオマスのカーボンニュートラル性と称し、2. (1) で改めて解説する。バイオマスを燃焼してエネルギー利用しても CO₂ 排出にはならないが、化石燃料と同様にバイオマスもほとんどの炭素を CO₂ に変換する。バイオマスの場合 CO₂ 排出が正味ゼロであるというのは、バイオマスエネルギー消費の際に排出した CO₂ を新たに植林した樹木や植物が吸収するという仮定に基づいている。このことは適切なバイオマスプランテーションの管理がされている限りは正しいが、多くの発展途上国で見られるように再植林されなかったり、少なくとも伐採された森林が元通りに植林されない森林からバイオマスエネルギーを得ている場合は、その限りではない。

また、バイオマスエネルギー利用が拡大すれば、土地利用に重大な懸念が生じる。すなわち、食糧生産や木材生産のような商業的な森林利用と競合することになる。最近の報告によれば、バイオマスエネルギーのポテンシャルは 2100 年段階 42 EJ から 50 EJ まで大きな幅があり、この見積もりの違いは利用可能な土地の確保とバイオマスの生産性による。食糧確保や環境保全と調和したバイオマスエネルギー利用が望まれる。

バイオマスの種類は多様であり、化学的性質、物理的性質、含水率、機械的強度がそれぞれことなる。これに対応してマテリアルやエネルギー変換技術もまた多様である。変換技術については後段で詳しく解説する。現在、化石燃料への依存度を低下させ、CO₂ を削減させ、かつ地域の経済を活性化するために、コストが低く、環境に負荷の低い、バイオマス変換技術の開発が進められている。

1.2 バイオマス特性

1.2.1 総論

バイオマス資源は物質的に炭素循環と光合成のプロセスを経て、基本的に何度でも利用できる。一方、化石資源は一過性の利用に局限される。化石燃焼が引き起こす不可逆的な CO₂ 放出は、大気中 CO₂ 蓄積により地球環境へ重大な影響をもたらす (Fig. 1.2.1.)。

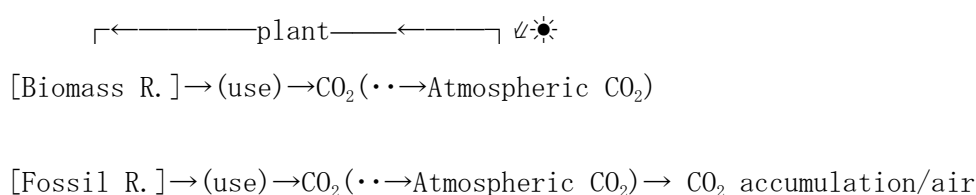


Fig. 1.2.1. Comparison of biomass and fossil system on Carbon cycling.

だが「再生可能」は「持続可能」と必ずしも同義ではない。植物による再生は、極めて脆弱な生態学的基盤の上に成立つ。その成立条件は：成長量と採取量のバランスを維持し、農林地の環境を保全することである。でなければ、長期的な持続可能性は失われる。

1.2.2 再生可能性

エネルギー資源は(1)枯渇性資源（ストック型＝化石資源）と、(2)再生可能資源（フロー型＝バイオマス、太陽、風力、水力）と二種がある。フロー資源は原理的に無限だが、一定期間中には利用可能量に制限がある。森林破壊を起こすような過剰な利用では、再生可能生産ではなくなる。バイオマス資源は両方のタイプを持っている。

(A) フロー型バイオマス資源。純生産量として 1700 億 t/年（世界年エネルギー需要の 7 倍）

(B) ストック型バイオマス資源。森林などに 1800 億 t（世界エネルギー需要/年の 80 倍）

バイオマス消費 (C) には、腐朽あるいは利用消費の二つの道がある。天然林では生産量と等しい量が腐朽し、(A) = (C) の平衡に達した状態にある。

(A) Flow-biomass	→ (B) Stock-biomass	→ (C) Putrefaction or useful consumption
170 Gt/y	1800 Gt	(variable)

(C)の量を(A)より増やすことはできないにしても、バイオマス利用には、(C)の枠内分配によって採取利用シェアを確保できる。これは政策や技術により変化できる。

1.2.3 炭素中立性

バイオマス燃料も燃焼により CO₂ を放出する。しかし、その成長過程で CO₂ を吸収することにより、CO₂ 免罪符を許容されている。すなわち [CO₂ 発生量] = [成長による CO₂ 固定量] であれば、免責され“炭素中立性”が承認される。しかし、石炭も超長期的にはバイオマス起源であって炭素は数億年をかけて循環している。そこで、CO 返済年限を考慮した免責率を評定する必要がある。バイオマスも燃焼直後にはその発生 CO₂ を返済することは不可能である。そこで温帯林の再生期間 25 年を基準にして [免責率 = 1] とする。再生に 100 年を要する亜寒帯林ではその免責率は [25/100 = 0.25] になる。2500 万年前の褐炭においては [25/2500 万 = 百万分の 1] の免責率しか与えられない。この基準によれば化石燃料が実際上、CO₂ 免罪符を使えないことが理解される。

1.2.4 持続可能な農業

バイオマス資源からの燃料生産プロセスには、外部からの多くのエネルギー投入 (E_f) が、栽培・輸送・変換処理などに費やされ、また、資源全量が利用されず、その一部は廃棄物 (E_w) となり損失 loss する (Fig. 1.2.3)。エネルギー生産システムには、得られたバイオ燃料のエネルギー E_z から E_f と E_w を差し引いた値が少なくとも正である必要がある。

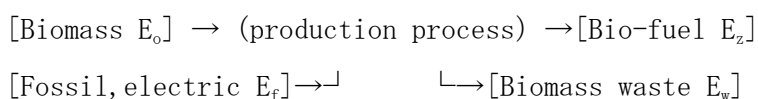


Fig. 1.2.3. Biomass energy balance for the income and expense.

この系の全エネルギー収率は、E_z/[E_o+E_f] で表わされ、0.5 以下であれば、バイオマスは補助燃料に過ぎない。しかし石炭混燃発電では、バイオマス寄与率が小さいがエネルギー収支比 (産物/投入化石) E_z/E_f が 1 を越すので新エネルギー生産型になる。バイオマス廃棄物が系内で化石燃料を代替できる場合、E_f が減少するので、投入エネルギー収支比は著しく改善される。代表的な成功例はサトウキビ産業のバガスによる化石燃料代替である。エネルギー収支比の劣るバイオマス生産は

しばしば炭素中立な持続可能性を失う。農業における穀類や芋類生産では 1.5~5 となる。一方、野菜の多くは 0.5 以下で赤字生産になる。この点、林業は栽培における投入 E が小さいため一般に農業より優れている。

(a) 人力投入. もし人力投入増を増大させると化石燃料・電力消費を削減できるため、みかけのエネルギー収支比を改善する。しかし人力と化石燃料投入は相補性がある。人力のエネルギー原単位は、生物評価：0.073 toe/年・人と全生活消費エネルギー：1 toe/年・人の間にあると推定される。労働集約的の生産は偽の省エネルギー型になる。

(b) N, P, K 肥料の循環. N(窒素)、P(リン)、K(カリウム)は肥料の主成分であり、収奪的な生産によってよく失われるので、N、P、K を土壌中に保つリサイクルシステムが必要である。P と K 持続のためには灰返還は木質火力発電において必須である。N は燃焼によって失われるので、他の N 供給路が回復のために不可欠である。例外的に伝統的な林業では雨水硝酸 N 補給で十分であって N 肥料を必要としない。しかし未来のエネルギー林には、N 収支が崩壊するので、N 肥料が要求されるであろう。

(c) 生物多様性の保全. 生物多様性は、バイオマス生産増強が、均一性、大規模性、および高密度プロセスを伴うことにより傷つき易い。だが農地林業のように混合植栽では持続的な土壌保全を行うことが期待される。

参考文献

Sano, H. in "Biomass Handbook", Japan Institute of Energy Ed., Ohm-sha, 2002, pp.311-323. (in Japanese)

UN Energy "Sustainable Bioenergy: A Framework for Decision Maker", 2007.

1.3 バイオマスの利用法

1.3.1 総論

バイオマスの利用にあたっては、まず利用目的と需要、原料の入手可能性を考慮し、多種のバイオマスの中から選択し、次いで適切な変換技術を用いてこれを利用目的に合った物質やエネルギーに変換する。

生物資源としてのバイオマスは、植物を中心として、動物、微生物などの生物やその有機物であ

る。植物資源としてとくに有用視されているものだけでも、膨大な数の種類がある。陸上の陸生バイオマスだけでなく海洋や湖沼・河川の水生バイオマスもあり、陸生バイオマスでは農作物のような草本系バイオマスと森林の樹木の木質系バイオマスが中心である。これらは、利用目的に沿って栽培され、あるいは自然の生態系の中から採取され、利用目的に合うように変換され利用される。利用目的にしたがってエネルギーや原料として使われるものは原バイオマスと呼ばれ、それに対し、生産・変換などの過程で本来の利用目的に合わないものは廃棄バイオマスと呼ばれる。廃棄バイオマスは、また別の目的で有効利用される。たとえば、サトウキビの絞りかすであるバガスは、砂糖やエタノールを造る過程での廃棄バイオマスであるが、エタノールの蒸留などに欠かせないエネルギー源である。廃棄バイオマスの利用は、食料との競合を避ける主要な手段でもあり、バガスは第2世代のエタノール原料としての期待もある。

バイオマスは一般に嵩張り、水分の多い状態では腐敗しやすいなど、運搬、貯蔵は容易でない。そのため生産された土地の近くで利用されるのが自然といえよう。したがって、地域で得られるバイオマス資源と近くの関連する地域での需要を考えてバイオマス利用を進めることが多い。しかしペレットなどのように高密度化したり、液体燃料のように、高いエネルギー密度で輸送に便利な形に変換されたときには遠隔地での利用も行われる可能性がある。

バイオマスの利用には物質としての利用（マテリアル利用）とエネルギー利用とがある。マテリアル利用は食料(food)、飼料(feed)、繊維(fiber)、工業原料(feedstock)、林産物(forest products)、肥料(fertilizer)、薬品類(fine chemicals)など多様である。エネルギー利用は燃料(fuel)としてバイオマスからエネルギーを得て二酸化炭素として大気に排出するもので、最終の利用形態である。これら様々な利用形態の英語の頭文字をとって8F利用と呼ぶこともある。

バイオマスを物質として利用するとき、その質の変化にともなって階段状の滝（カスケード）のように多段階の利用が可能である。例えば Fig. 1.3.1のように、バイオマスを先ず食料として利用し、食品廃棄物の一部を飼料や肥料にするとか、建築木材がそ

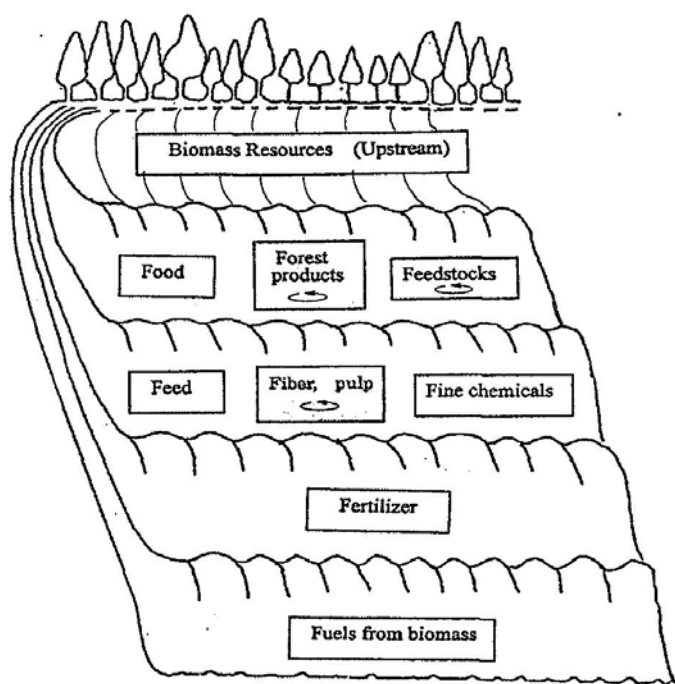


Fig. 1.3.1. Cascade use and recycling of biomass.

の寿命を終えたあとは、チップボードやパルプにされ、最終的には固体燃料としてエネルギー利用される。また、紙や繊維のように同じ利用目的でリサイクル利用される場合もある (Fig. 1.3.1 のひとまわり矢印)。

物質としてリサイクルやカスケード利用をしている間は、炭素は物質にとじこめられたままであるので、それだけ温室効果ガスの排出を遅らせ温暖化防止に役立つことになる。

1.3.2 変換と利用

バイオマスの変換には、利用目的に合うようバイオマスの質を変えるための数多くの技術が用意されている。変換技術には、物理的変換、化学的変換、生物学的変換がある。Fig. 1.3.2 に典型的な変換技術の例を挙げる。物理的変換は、粉碎、磨砕、蒸気爆砕などのバイオマスの表面積を増やしたり、組織を破壊して反応を促進するもの、分離、抽出、蒸留など必要な成分等を取り出すもの、嵩張るバイオマスを圧縮する高密度化、乾燥や水分調整で水分の多いバイオマスを利用に適した状態にすることなど前処理的に用いられるものが多い。

化学的変換は、加水分解、部分酸化、燃焼、炭化、熱分解、水熱反応等バイオマスを分解する反応、合成、高分子化、水素添加等バイオマスを合成または改質するもの、燃料電池のように酸化反応過程で電子をとり出し発電する技術など実に多様な形で使われている。

生物学的変換は、エタノール発酵、メタン発酵、アセトン・ブタノール発酵、水素発酵などの発酵技術とセルロースの糖化等様々な過程で用いられる酵素処理が主要なものである。しかし光合成や光分解もバイオマスの基本過程だけにその高効率化や応用が重視されている。

なお、バイオマスの燃焼熱を機械的動力に変換する熱サイクルには、オットーサイクル (ガソリン機関)、ディ

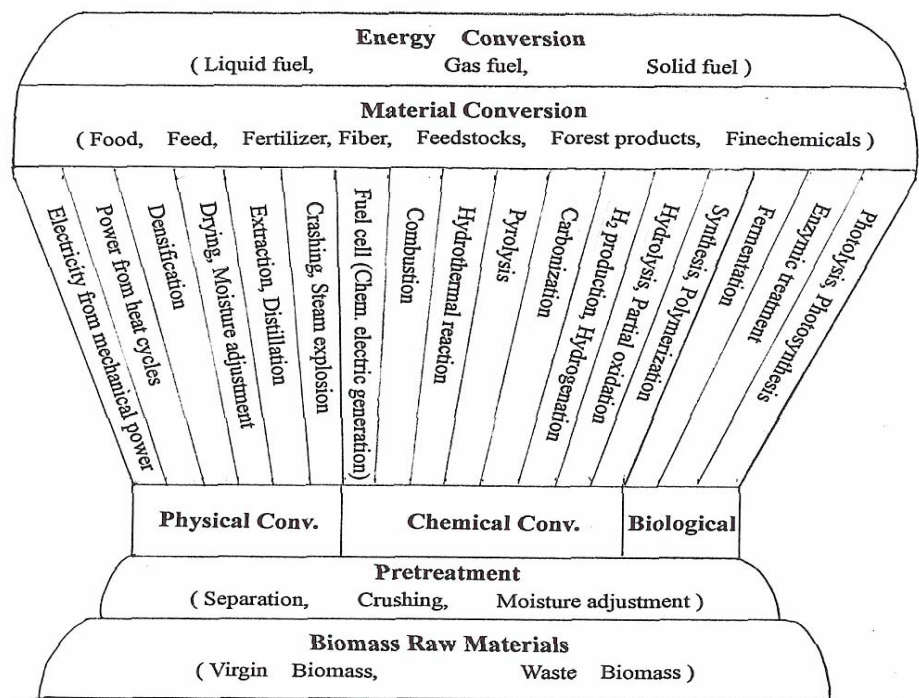


Fig. 1.3.2. Various conversion and pretreatment technologies.

ーゼルサイクル（ディーゼル機関）、ランキンサイクル（蒸気機関）ブレイトンサイクル（ガスタービン）などが用いられる。機械的動力を電力に変換するには電磁誘導を利用した発電機がつかわれる。

バイオマスの質を変える本格的な変換過程に先立って前処理が行われることも多い。分離、抽出、粉砕、水分調整など本格的な変換の前に必要な前処理が行われる。

Fig. 1.3.2 はバイオマス変換のマジックボックスとでもいうべきもので、箱の底に入れられた原バイオマスや廃棄バイオマスは前処理工程をへて、様々な変換技術を使って質を変え、利用目的に合った物質やエネルギーに変換される。

変換過程の評価は、変換された物質がいかに利用目的にかなっているかの質とともに、変換の収率やエネルギー効率で評価される。これらが高いほど一般に変換の経済性も良くなる。

バイオマスの変換・利用システムを計画するときには、バイオマスの収集量の季節変動、輸送手段と距離、貯蔵方法等を検討し、需要とバランスするか確認する。また輸送、変換、利用システムの運用組織、運用ルール、関連する法規との整合性、可能な助成等も含めて経済性等を確かめる必要がある。

1.4 バイオマス利用の利点

1.4.1 総論

バイオマス由来のエネルギーは、多くの先進国の現在の技術や市場の状況の下では、化石燃料に対して経済的な競争力を有してはいないのが一般である。しかし、マテリアルあるいはエネルギーを目的としたバイオマス生産には、多様なメリットが期待できる。そのメリットはケースバイケースで異なるが、とりわけ注目すべきは、化石燃料の消費に伴う温室効果ガスの削減、新たな産業の誕生や地域内で生産された原材料の利用に伴う雇用の創出と収入の増加、そして輸入依存度の低下によるエネルギーセキュリティの改善である。しかし、これらのメリットの価値は、バイオマスおよびバイオエネルギー生産コストに比べ理解を得られていない。これらのメリットを評価することは、バイオマスとバイオエネルギーの総合的な競争力に関する理解をより具体的なものにするとともに、バイオエネルギー開発や政策形成に有意義な情報を与えるものとなる。

1.4.2 石油資源の枯渇

かつて森林資源や石炭は豊富に存在し、エネルギー需要に応えるのに十分な資源量が存在していた。しかし、人間活動が予想を超えるほどに盛んになるにつれ、石炭、そして石油を燃料とするより効率の高いエネルギー技術の開発が必要とされるようになった。

世界の原油の究極埋蔵量は2兆バレルと推定されている。世界の1日の原油消費量は7,170万バレルである。現在、世界では1兆バレルがすでに消費されてしまい、残り1兆バレルが地下に埋蔵されている(Asifa and Muneer, 2007)。石油を代替するエネルギーへの転換がなければ、原油やその他の燃料が急騰し、経済は破滅的な状況に陥る可能性がある。バイオマス利用を増やすことは、減りつつある原油供給の寿命を伸ばすことにつながる。たとえば、Carpentieri *et al.* (2005)は、天然資源の枯渇を遅らせるという観点において、バイオマス利用の重要な環境面での利点を示している。

1.4.3 地球温暖化

世界的に、温室効果ガス、特に二酸化炭素の排出量の増加が世界の気候にとって脅威となっている。2000年の推測によれば、毎年2000万トン以上の二酸化炭素が大気中に排出されている(Saxena *et al.*, in press)。この傾向が続けば、大雨や大洪水、干ばつや地域的にアンバランスな天候といった甚大な自然災害が発生することが予想される。バイオマスは、そのライフサイクルにおいてカーボン・ニュートラルな資源であることから、温暖化防止の一番手として期待されている。バイオマスは、石炭、石油、天然ガスに次いで世界で4番目に使用量の多いエネルギー資源であり、世界の一次エネルギーのおよそ14%を供給している(Saxena *et al.*, in press)。バイオマスは、現在も世界中で重要なエネルギー資源と考えられている。

エネルギー消費に伴う温室効果ガスを削減するために、排出量に対する課税や排出権取引などの政策手段が提案されてきた。これらの気候緩和のための政策は、二酸化炭素を排出する化石燃料を代替できるという点において、バイオエネルギーの化石燃料に対する競争力の向上につながるだろう。しかし、バイオマスのエネルギー変換時における投入エネルギーは、たいていは化石燃料である。化石燃料と比べ、バイオマスのライフサイクルにおけるエネルギー収支はプラスになると考えられる。しかしそれはプロセスで異なり、時には化石エネルギーの総投入量が化石燃料に比べかろうじて少ないか、あるいは多くなってしまうことさえあるかもしれない。バイオエネルギーシステムは、ライフサイクルの視点、さらにはLCAに基づいて化石燃料と比較すべきである。

1.4.4 生活の質の向上

発展途上国経済においては農業が非常に重要な産業であるため、持続可能な農業が農民生活の質や彼らの収入の向上につながることを望ましい。途上国の農村地域では識字率が高くはないと考えられるため、農民に対する教育が重要となる。したがって、技術に関して適切な情報を農民に提供する必要がある。バイオマス利用が農民にとって有効であるために重要なことは、バイオマスプラントや原料を確保できる場所にアクセスしやすいことである。仮に農民がバイオマス原料を所有していたり生産したりしていても、それらを利用できる場所にアクセスする手段がなければ意味がないからである。

1.4.5 農民の収入の増加

農民を支援するには、主に2つの方法があると考えられる(The Japan Institute of Energy, 2007)。1つは便利なエネルギー源へアクセスできるよう、エネルギーを供給することである。タイでは小規模メタン発酵が農民に調理用ガスを供給し、それがプロパンガスの節約につながっている。このサポートは化石燃料の使用量の削減にもつながるため、持続可能な農業のためにも有効である。もう1つのサポートは現金である。農民がエタノールの原料を栽培し、それをより高い価格で販売すれば、電力を購入するための現金を得ることができる。一般にエタノール燃料を使用する層は農民に比べて裕福であると考えられるため、このメカニズムは‘富の再分配’とみなすこともできる。

1.4.6 エネルギーセキュリティ

すべての国、とりわけ先進国の経済は、エネルギーの安定供給に立脚している。エネルギーセキュリティとは、適切な価格で多様な形態のエネルギーを常に十分な量確保できることを意味する。もしエネルギーが持続可能な開発に寄与するものであるとすれば、エネルギーセキュリティが長期間維持されなければならない。しかし、ほとんどの国が依存している化石燃料には、埋蔵量に地域的なバラツキがあるため、エネルギーセキュリティに対する注意が重要となる。国際的に輸入原油に対する依存度が高まっていることを考えると、近い将来エネルギー供給がより脆弱なものとなる可能性がある。その点、自国の資源であるバイオマスには、原油のような国際的な価格変動や供給の不確実性に左右されないというメリットがある。

1.4.7 外貨獲得

発展途上国にとってバイオエネルギーの輸出は、外貨獲得のためのチャンスである。タイのキャッサバを例に挙げると、現時点でキャッサバ生産は、食糧とエタノールの間でバランスしている。しかし、将来的な用途は、注意深く決定する必要がある。今後エタノールのためのキャッサバ生産は増加すると考えられるが、一方でエネルギー利用と食糧生産との競合がしばしば指摘される。つまり、国際的なエタノール需要が国内の食糧の安定供給を脅かす可能性があるということである。

参考文献

- Asifa, M.; Muneer, T. Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11**, 1388-1413 (2007)
- Carpentieri, M.; Corti, A.; Lombardi, L. Life cycle assessment (LCA) of an integrated biomass gasification combined cycle (IBGCC) with CO₂ removal, *Energy Conservation and Management*, **46**, 1790-1808 (2005)
- Saxena, R.C.; Adhikaria, D.K.; Goyal, H.B. Biomass-based energy fuel through biochemical routes: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (in press)
- The Japan Institute of Energy. "Report on the Investigation and Technological Exchange Projects Concerning Sustainable Agriculture and Related Environmental Issues," Entrusted by the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan (Fiscal year of 2006) (2007)

第2部 バイオマス資源

2.1 バイオマスの分類

2.1.1 バイオマスの定義

すでに1.1章で「バイオマスとは？」が記述されているが、「バイオマス:biomass = [bio] + [mass]」は、元来は生態学の分野で生物量、もしくは生物現存量を表す用語である。生態学の用語の範囲を超え、「エネルギー源としての生物資源」の意味を含むようになったのは、石油ショック以後、代替（新）エネルギーの推進が強く提唱されてから、と言われている。「バイオマス」の厳密な定義は確立しておらず、専門分野によっても異なる。エネルギー資源の観点からは、「ある一定量集積した動植物資源とこれを起源とする廃棄物の総称（ただし、化石資源を除く）」とすることが多い。従って、農作物、木材、海藻などの従来型農林水産資源のみならず、パルプスラッジ、黒液、アルコール発酵残渣などの有機性産業廃棄物、厨芥や紙くずなどの一般都市ごみ、下水汚泥など、多種多様にわたっている。国によっては、都市廃棄物をバイオマスに分類しない場合もあるので、統計データの取り扱いには注意が必要である。

2.1.2 法律上のバイオマス（エネルギー）の定義

法律での定義について日本の例を示す。日本においては、2002年1月25日付けで、「新エネルギー利用などの促進に関する特別措置法(通称：新エネルギー法)施行令」の一部が改正され、「バイオマス」が初めて新エネルギーとして認知された。Fig. 2.1.1に新エネルギー法におけるバイオマスの位置づけを示す。これまで再生資源の一部としてくくられていたバイオマスは、独立した新エネルギー源となった。ただし、古紙、食品廃棄物や建築廃材、黒液のように、再生資源ともバイオマスとも位置づけられるものもあり、厳密な境界線は引かれていない。

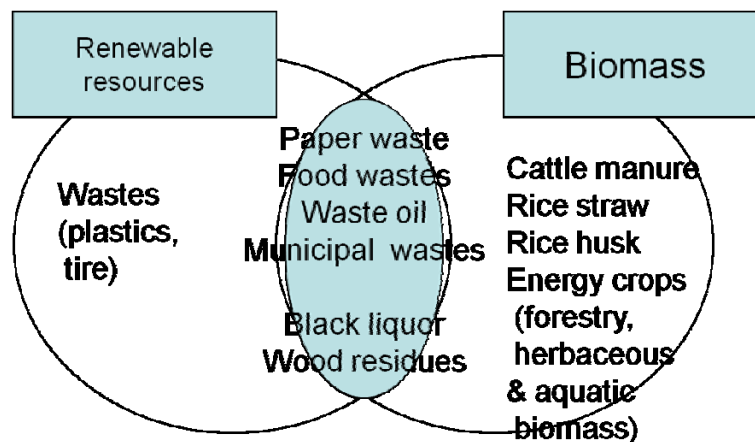


Fig. 2.1.1. Definition of biomass energy in Japanese New Energy Promotion Law.

2.1.3 バイオマスエネルギーの特徴

19世紀まで、薪炭としてエネルギーの主流であったものの、20世紀には石炭、石油に取って代わられたバイオマスが、21世紀にまた復活の兆しを見せているのは、バイオマスの有する、再生可能であり、貯蔵性・代替性があり、膨大な資源量を有し、カーボン・ニュートラルであると言う、4つの特性による。

2.1.4 バイオマスの分類

分野により定義の異なるバイオマスに確立した分類法はなく、目的、用途に応じて分類法は変わってくる。自然界の存在状態から分類する生物学的分類（生態学上の分類や植生による分類など）と、資源としての利用、用途の観点から行う分類に大別できる。エネルギー（資源）として有効利用を図る場合は、後者の概念が大きな意味を持つ。

2.1.5 バイオマス分類の一例（利用、用途の観点からの分類）

Fig. 2.1.2 に、バイオマス分類の一例を示す。本分類法では、農林水産資源の従来型の利用とそこから排出される廃棄物だけでなく、将来のエネルギー生産を主目的としたプランテーションバイオマスも範疇に入れている。発生源による分類は、バイオマス利用システムの設計に重要となる。

Biomass

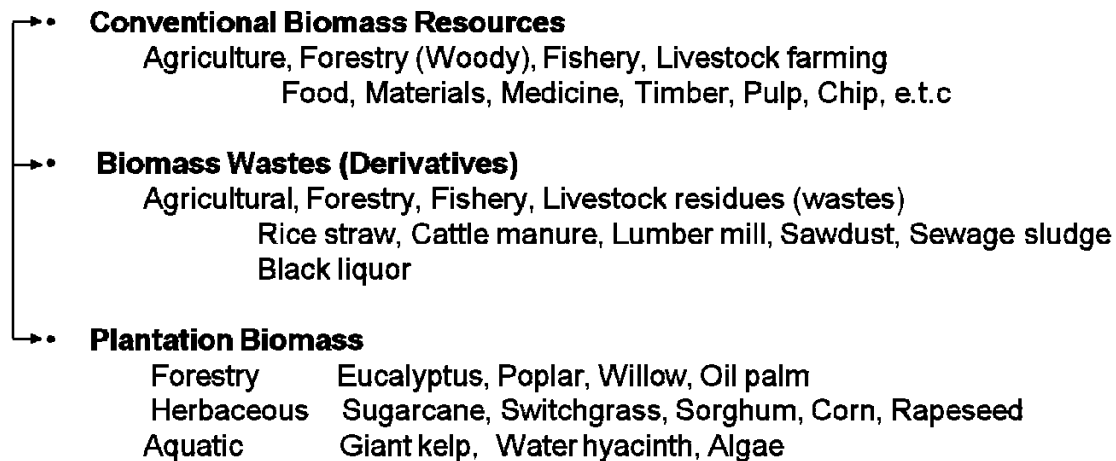


Fig. 2.1.2. Biomass categorization (in terms of use and application).

バイオマスに利用、特にエネルギーへの利用については、含水率は大きな因子となる。「含水率」は、分野によって定義が異なることがあるので、含水率の表示には注意を要する。エネルギー分野では、含水率の多くは、以下のように定義される。

$$\text{含水率} = \text{水分重量} / \text{総重量} \times 100 \quad [\%] \quad (2.1.1)$$

$$\text{総重量} = \text{バイオマス乾燥重量} + \text{水分重量} \quad (2.1.2)$$

この場合、定義上、含水率は100%を超えることはない。

一方、森林、生態学の分野では、含水率を以下のように定義することが多い。

$$\text{含水率} = \text{水分量} / \text{バイオマス乾燥重量} \times 100 \quad [\%] \quad (2.1.3)$$

本ハンドブックでは、原則として式(2.1.1)の含水率を用いている。

バイオマスはセルロース、リグニン、たんぱく質などからなる天然高分子化合物であるが、生物に由来するというその特性から含水率が高いものが多い。Fig. 2.1.3 に各種バイオマスの含水率を示す。乾燥木や古紙のように含水率が 20%前後のものから、微細藻類、発酵残渣、汚泥のように含水率が 95%を超えるものまで多様である。エネルギー変換する場合は、含水状態に応じたプロセスを選択する必要がある。

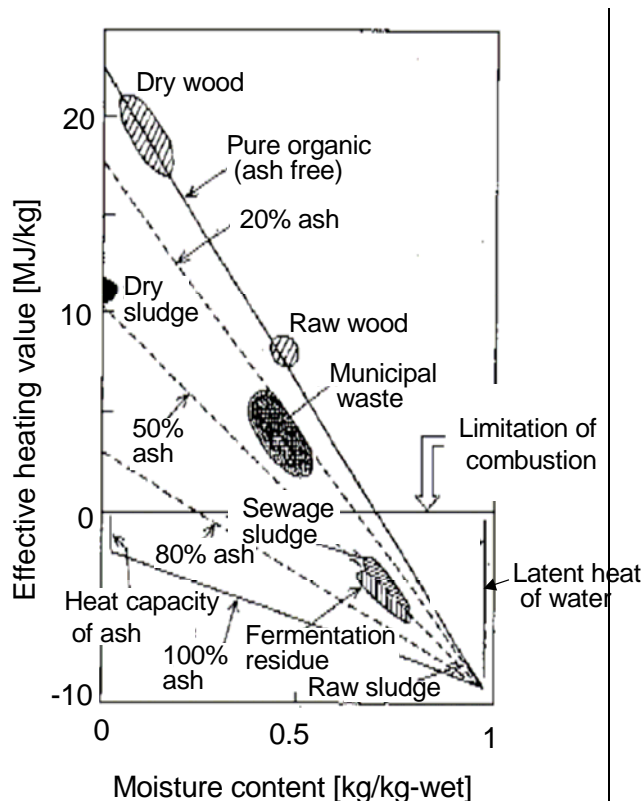


Fig. 2.1.3 Relation of moisture content and effective heating value.

参考文献

Ogi, T. in “Biomass Handbook”, Japan Institute of Energy Ed., Ohm-sha, 2002, pp.2-6 (in Japanese)

2.2 資源量の概算

現在、地球上には森林や海洋をはじめとする広範な地域にわたって膨大な量のバイオマスがスト

ックとして存在する。世界の総バイオマス量は、陸上に約 1.8 兆 t、海洋中に約 40 億 t、土壌中にも陸上バイオマスに匹敵する量のバイオマスが賦存している。陸上の総バイオマス量をエネルギー換算すると 33,000 EJ となり、世界の年間エネルギー消費量の 80 倍以上に相当する

しかしながら、この中には人類を始め様々な生物の食料として利用されているもの、また人類が社会生活を営む上で食料以外の用途としても利用されているもの等が含まれる。したがって、バイオマスをエネルギー源として検討する上で転換可能なバイオマスの資源量を推算することは重要である。

2.2.1 廃棄物系バイオマスの資源量の推算

廃棄物系バイオマスとは、われわれの生活にともない廃棄物や残さとして発生するバイオマスを示す。ここでは、この発生量を「バイオマス発生量」とする。バイオマス発生量には、エネルギー以外の飼料や肥料などの用途で利用されているものも含む。また、現在利用用途がなく、エネルギー利用可能なバイオマスの量を「バイオマス利用可能量」とする。

ここでは、農業や林業、畜産業などの生産に伴い発生する廃棄物系バイオマスを例として資源量の概算方法を整理する。

(a) 廃棄物系バイオマスの発生量

廃棄物系バイオマスの資源量を推定するためには、その発生量を把握する必要があるが、世界各国・各地域における発生量を個々に把握することは困難である。したがって、バイオマス資源の生産量に対する廃棄物発生率等を仮定することにより、その発生量を推定することが多い。Table 2.2.1 に廃棄物系バイオマスの資源量を推定する際のパラメータ例 [Hall et al., 1993] を示す。ただし、このパラメータは世界全体を対象にして一般化されたものであり、狭い地域での検討を行う際には、その地域に沿ったパラメータを設定することが望ましい。

Table 2.2.1. Parameters used for estimating waste biomass production and amount of resources

Biomass species	Ratio of waste production(t/t)	Coefficient of energy conversion (GJ/t)
Rice	1.4	16.3
Wheat	1.3	17.5
Maize (corn)	1.0	17.7
Roots and tubers	0.4	6.0
Sugarcane residue (tops and leaves)	0.28	17.33
Cattle	1.10 (t/y/head)	15.0
Swine	0.22 (t/y/head)	17.0
Poultry	0.037(t/y/head)	13.5
Horses	0.55 (t/y/head)	14.9
Buffaloes and camels	1.46 (t/y/head)	14.9
Sheep and goats	0.18 (t/y/head)	17.8
Industrial logs	1.17	16.0
Fuel logs	0.67	16.0
Wood waste	0.784	16.0

*dung production rate, dry tons basis

Fig. 2.2.1 に、これらのパラメータを用い、以下の手順により推定した廃棄物系バイオマスの現存量(年間値)を示す。

- 農産および林産廃棄物の発生量は、農産物(2000年)、林産物(1999年)の生産量を FAO の統計を用いて整備し、廃棄物発生率を用いて推定。
- 畜産廃棄物の発生量は、FAO 統計より家畜頭羽数(2000年)を求め、1頭当たりの糞尿量を用いて推定。
- 算出した廃棄物発生量にエネルギー換算係数を積算し、エネルギー量として現存量を推定。

廃棄物系バイオマスの現存量(年間値)は、畜産バイオマスが約 43 EJ、農産バイオマスが約 48 EJ、林産バイオマスが約 37 EJ となり、合計すると約 128 EJ 程度となる。内訳として、最も大きな資

源量を有するのは約 22 EJ となる牛糞尿であり、次に約 20 EJ となる丸太残余が続く。

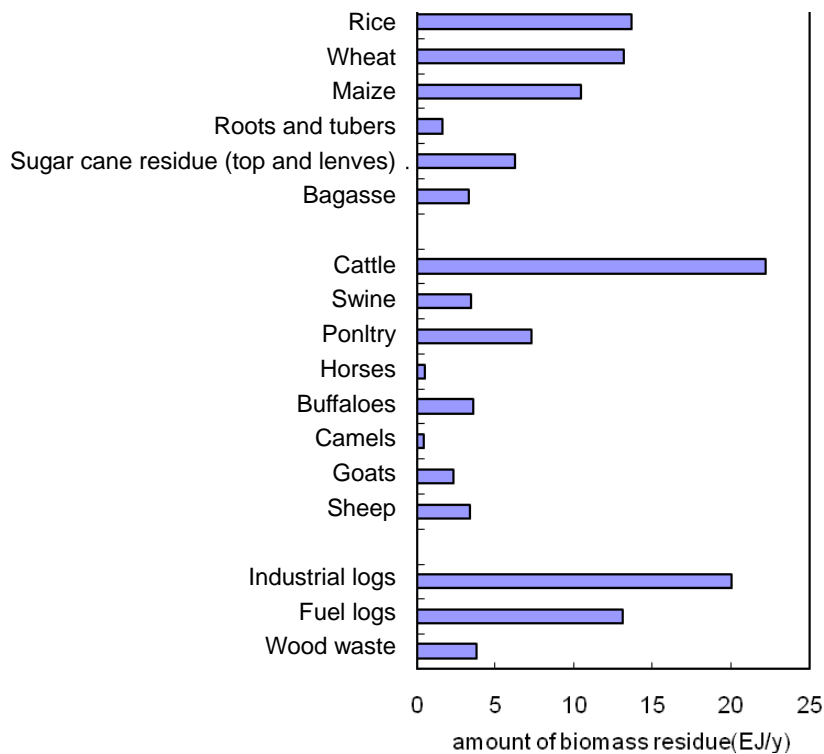


Fig. 2.2.1. Amount of biomass residue in the world.

(b) 廃棄物系バイオマスのエネルギー利用可能量

廃棄物系バイオマスの現存量の一部は既に他の用途に使用されており、使用されていない場合においても、その全量を効率的に回収し、エネルギー源として利用することは困難と考えられる。例えば、わら類の一部は現在家畜の飼料として利用されている。また、牛糞尿を例とすると、放し飼いの場合、糞尿を収集するのはほぼ不可能と考えられ、繋ぎ飼いの場合においても発生した廃棄物全てが収集できるわけではない。利用可能と考えられるバイオマス資源量を推定するにはこのような利用可能性を考慮する必要があり、廃棄物系バイオマスのエネルギーポテンシャルは、現存量のうちエネルギー源として実際に利用可能と考えられる資源量となる。Table 2.2.2 に Hall らの提案した利用可能率を示す。

Table 2.2.2. Biomass species and availability ratio of energy

	Biomass species	Availability ratio of energy (%)
Agricultural waste	Rice, Wheat, Maize, Roots and tubers, Sugarcane (crop residue)	25
Livestock waste	Cattle, Sheep and Goats, Swine , Horses, Buffaloes and Camels, Poultry	12.5
Forestry waste	Industrial log	75
	Fuel log	25
	Wood waste	100

[Hall et al., 1993]

また、利用可能率を用いて推計した廃棄物系バイオマスのエネルギー利用可能量を Fig. 2.2.2 に示す。廃棄物系バイオマスのエネルギーポテンシャル(年間値)は、林産廃棄物系バイオマスが最も多く、世界全体で約 22 EJ に相当する。なかでも丸太残余は約 3 分の 2 に相当する約 15 EJ 存在し、これは全てのバイオマス資源量に対しても約 36%にも達する。農産廃棄物系バイオマスは世界全体で約 15 EJ 存在する。対象としている農産バイオマスは各々平均して 1.5~3.5 EJ 程度存在する。一方、畜産廃棄物系バイオマスは、世界全体で約 5.4 EJ であり、最も多い牛糞尿でも約 2.8 EJ である。

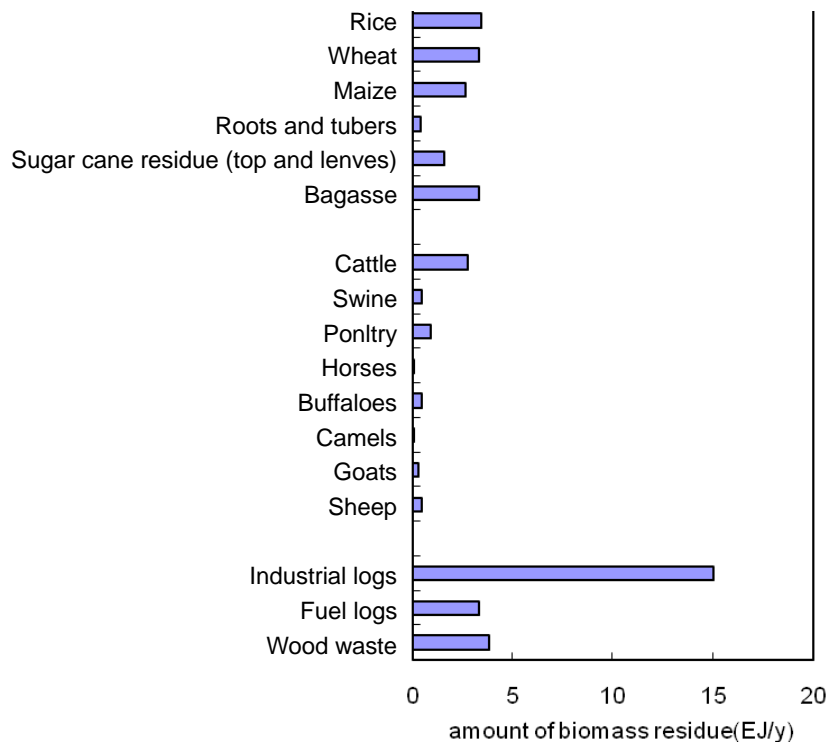


Fig. 2.2.2. availability of biomass residue in the world.

参考文献

- FAO (The Food and Agriculture Organization of the United Nations), FAO Statistical Database, (<http://www.fao.org/>)
- Hall, D. O. et al. (1993), "Biomass for Energy: Supply Prospects", In: Renewable Energy, Johansson, T. B. eds., pp.594, Washington, Island Press.

2.3 バイオマスの組成

2.3.1 バイオマスの組成の概要

バイオマスは多種多様で、その構成成分も多様である。主な組成成分としては、セルロース、ヘミセルロース、リグニン、デンプン、たんぱく質などがあげられる。樹木は主にセルロース、ヘミセルロース、リグニンより構成され、成分組成比はかわるものの草本も同じである。穀物はデンプンが多く、家畜糞尿はたんぱく質が多いなど、種によって異なる。エネルギー利用の観点からは、セルロースなどを主とする樹木などのリグノセルロース系バイオマスが存在量も多く、ポテンシャルが高い。これらの組成成分は、化学構造が異なるため反応性も異なる。

2.3.2 代表的な組成成分

(a) セルロース

D-グルコース (C₆H₁₂O₆) が規則正し β-グルコシド結合した多糖類。分子式 (C₆H₁₂O₆)_n で示され、n であらわされる重合度は約数千~数万と幅広く分布する。完全に加水分解すると D-グルコース (単糖) になるが、部分加水分解では、二糖類 (セロビオース) や n=3-10 程度の多糖類を生じる。結晶構造をもち、酸やアルカリに対する抵抗性も高い。Fig. 2.3.1-a にセルロースの構造式を示す。

(b) ヘミセルロース

D-キシロースや D-アラビノースなどの 5 単糖類や、D-マンノース、D-ガラクトース、D-グルコースなどの 6 単糖類を構成ユニットとする多糖類。5 単糖が 6 単糖よりも多く、平均分子式は (C₅H₈O₄)_n であらわされる。重合度 (n) も 50-200 とセルロースに比べ小さいので、セルロースに比べて分解しやすく、多くはアルカリ溶液に可溶である。ヘミセルロースの中で量が多いのはキシランで、これは D-キシロースが 1,4-結合したものである。Fig. 2.3.1-c にキシランの構造式を示す。そのほかのヘミセルロースとして、グルコマンナンなどがあるが、いずれのヘミセルロースも樹種、部位により存在量が異なる。

(c) リグニン

フェニルプロパンとその誘導体を構成ユニットとし、3 次元的に結合した化合物。構造は複雑で、まだ完全に解明されていない。Fig. 2.3.1-d に構成ユニットを示す。複雑な 3 次元構造を有し、微生物や科学薬品による分解を受けにくいことから、植物の骨格形成、保護材として機能していると考えられる。セルロース、ヘミセルロース、リグニンは、多くのバイオマスに普遍的に存在し、地

球上でもっとも豊富な天然炭素資源である。

(d) スターチ (でんぷん)

セルロースと同じく、D-グルコースを構成ユニットとするが、 α -グルコシド結合でつながる多糖類。(図結合様式が異なるため、セルロースが水に不溶であるのに対し、デンプンは熱水に可溶性部分 (Fig. 2.3.1-b 参照) アミロース、分子量 1 万~5 万程度。デンプンの 10~20%) と不溶性部分 (アミロペクチン、分子量 5 万~10 万程度。デンプンの 80~90%) とが存在する。種子、塊(根)、茎に存在し、食糧としての価値が極めて高い。

(e) たんぱく質

アミノ酸の高度に重合した高分子化合物。構成アミノ酸の種類と配合割合、重合度により性状が異なる。バイオマスにおいては主成分ではなく、セルロース、ヘミセルロース、リグニンに比べ含有割合は低い。

(f) その他の成分(有機物&無機物)

種により偏在するが、付加価値の高いものとしてグリセリド (代表例: ナタネやパーム椰子などに含まれる植物オイル) とショ糖 (代表例: サトウキビやテンサイ) がある。他にアルカロイド、ピグメント、テルペン、ワックスがあり、これらは少量ではあるが、医薬品原料として極めて付加価値が高い。バイオマスは高分子有機化合物であるが、微量成分として、無機物(灰分)を含む。主な金属元素は Ca, K, P, Mg, Si, Al, Fe, Na などで、原料により含有物と量が異なる。

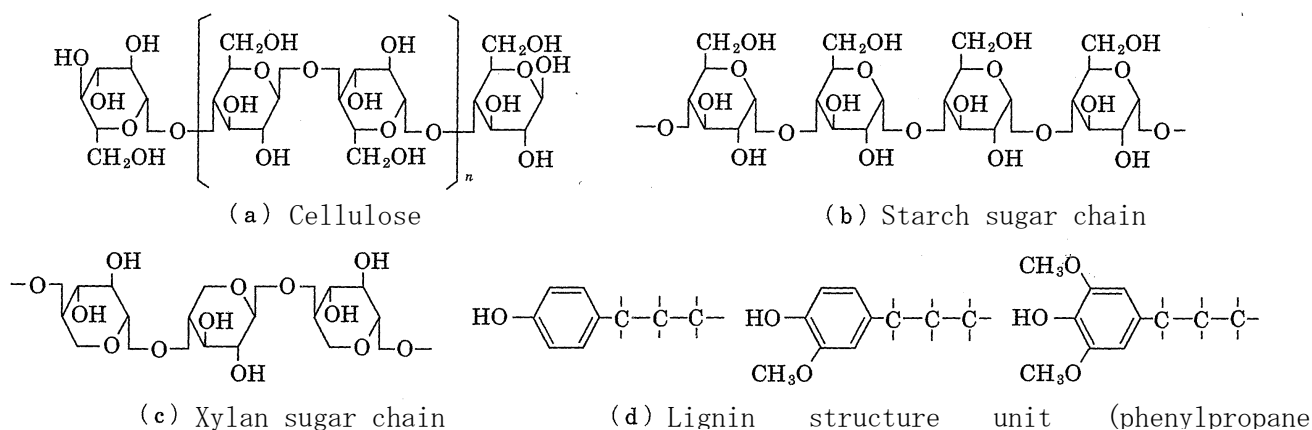


Fig. 2.3.1 Chemical structures of major biomass components.

2.3.3 代表的なバイオマスの組成分析例

Table 2.3.1 に主要なバイオマスの代表的組成構成を示す。例外はあるが、陸生バイオマスの主

要構成成分を存在量順に掲げると、セルロース、ヘミセルロース、リグニン、たんぱく質となる。水生バイオマスは異なる組成を示す。Table 2.3.1 にあげられたのは、植物系バイオマスであるが、Table 2.3.2 には、汚泥などの含水率の高い廃棄物系バイオマスの成分組成を示す。Table 2.3.1 と Table 2.3.2 では、組成成分分類が異なり、Table 2.3.1 のセルロースとリグニンは Table 2.3.2 では粗繊維、Table 2.3.1 のヘミセルロースは Table 2.3.2 では炭水化物の項に分類されている。

Table 2.3.1 Typical chemical analyses of representative biomass (Part 1) (wt%)

Category of biomass	Marine	Freshwater	Herbaceous	Woody	Waste
	Giant brown kelp	Water hyacinth	Bermuda grass	Hybrid poplar	Refuse-derived fuel (RDF)
Cellulose	4.8	16.2	31.7	41.3	65.6
Hemicellulose	—	55.5	40.2	32.9	11.2
Lignin	—	6.1	4.1	25.6	3.1
Mannitol	18.7	—	—	—	—
Alginin	14.2	—	—	—	—
Crude protein	15.9	12.3	12.3	2.1	3.5
Ash	45.8	22.4	5.0	1.0	16.7
Total*	—	112.5	93.3	102.9	100.1

* Totals may not necessarily be 100 because each component was measured with a different method.

Table 2.3.2. Typical chemical analyses of representative biomass (Part 2: Waste biomass with high moisture content). (wt%)

Feedstock biomass	Alcohol fermentation stillage (rice)	Alcohol fermentation stillage (sweet potato)	Starch sludge	Microalgae (<i>Dunaliella</i>)	Aquatic (Water hyacinth)	Sewage Sludge
Moisture content	76.7	88.6	82.2	78.4	85.2	76.7
Ash a)	1.3	4.4	23	23.6	19.6	16.4
b)						
Fat	8.3	1.8	0.7	20.5	2.5	12.9
Protein	56.5	28.5	59.6	63.6	24.4	42.3
Crude fiber	2.1	11.9	5.4	1.2	20.6	18.1
Carbohydrates	33	57.8	34.3	14.7	52.5	26.7
b)						
C	47.9	47.3	44.6	53.3	47.6	51.4
H	6.7	7	7.2	5.2	6.1	7.9
N	7.5	4.2	9	9.8	3.7	6.5
O	37.9	41.5	48.2	31.7	42.1	40.7

a) Based on dry weight.

b) Based on organic content.

参考文献

Ogi, T. in “Biomass Handbook”, Japan Institute of Ed., Ohm-sha, 2002, PP.12-15 (in Japanese)

2.4 バイオマスの含有エネルギー量

2.4.1 バイオマスのエネルギー量の指標

バイオマス・エネルギーシステムの構築にあたっては、各種原料バイオマスの有するエネルギー

量を把握しておくことが必要である。バイオマス含有エネルギーの指標として、発熱量がよく用いられる。発熱量は、物質が完全燃焼する場合に発生する熱量で、燃焼熱ともいう。発熱量は、バイオマス中に含まれる組成成分の比や構成元素の種類や比率（特に炭素含有量）に依存する。

(a) 高位発熱量と低位発熱量

バイオマスは主に炭素、水素、酸素より構成される有機物で、完全燃焼させると水と二酸化炭素を生成する。生成した水（水蒸気）は多量の潜熱をもっており、凝縮の際、これを放出する。潜熱を包含した発熱量を高位発熱量(HHV: High Heating Value)といい、潜熱を差し引いたものを低位発熱量(LHV: Low Heating Value)という。

(b) 有効熱量

発熱量 Q_0 は、物質単位量を標準状態で完全燃焼させた場合に生じる熱量である。実際のバイオマスは水や灰分を多く含んだ状態で存在しており、エネルギーを製造する場合はこれらの水や灰分を考慮しなければならない。バイオマスが存在している状態で自燃するかどうかの指標として、低位発熱量の検討だけでは不十分で、周りの空気を炎維持温度まで昇温するエネルギー、灰分の吸熱エネルギーも考慮しなければならない。これらを考慮した熱量を有効熱量といい、以下の式で表す。

$$\text{有効熱量 } Q = Q_0(1-w) - 1000w - [\text{排煙吸熱}] - [\text{灰分吸熱}] \quad (w: \text{含水率})$$

2.1の Fig. 2.1.3 に掲げているのは、900°Cでの有効熱量 Q の計算値である。有効熱量 Q が正(+)になることが、燃焼成立の条件となる。

2.4.2 各種バイオマスの発熱量

Table 2.4.1 に、代表的なバイオマスの含水率、有機物含有量、灰分含有量、発熱量を掲げる。バイオマス種により、含水率は大きく変化する。（一例：紙の 3%、汚泥の 98%など）一般的なバイオマスでは、含水率が 2/3 を超えると有効熱量が負(-)となるので、バイオマスそれ自体が高い発熱量を有していても、自然に存在する状態で含水率が高い場合は、燃焼には適さない。（例：ホテイアオイや下水汚泥は乾燥状態での発熱量は高いが、採取時の含水率は 95%前後で、燃焼には不向きである。）

Table 2.4.1. Typical analyses and heating values of representative types of biomass, coal, and peat.

Category	Biomass	Moisture content* [wt%]	Organic matter [dry wt%]	Ash** [wt%]	High heating value [MJ/dry-kg]
Waste	Cattle manure	20—70	76.5	23.5	13.4
	Activated biosolids	90—97	76.5	23.5	18.3
	Refuse-derived fuel (RDF)	15—30	86.1	13.9	12.7
	Sawdust	15—60	99.0	1.0	20.5
Herbaceous plant	Sweet sorghum	20—70	91.0	9.0	17.6
	Switch grass	30—70	89.9	10.1	18.0
Aquatic plant	Giant brown kelp	85—97	54.2	45.8	10.3
	Water hyacinth	85—97	77.3	22.7	16.0
Woody plant	Eucalyptus	30—60	97.6	2.4	18.7
	Hybrid poplar	30—60	99.0	1.0	19.5
	Sycamore	30—60	99.8	0.2	21.0
Derivatives	Paper	3—13	94.0	6.0	17.6
	Pine bark	5—30	97.1	2.9	20.1
	Rice straw	5—15	80.8	19.2	15.2
Coal	Illinois bituminous	5—10	91.3	8.7	28.3
Peat	Reed sedge	70 —90	92.3	7.7	20.8

* Moisture content is determined from the weight loss after drying for at 105°C under atmospheric pressure.

** Ash content is determined from the weight of residue (metal oxides) left after heating at about 800°C.

全有機物量は全量から灰分量を差し引いたもので、灰分はエネルギーとしての価値はゼロであるので、有機物量の多いほうが発熱量は高く、エネルギー原料として望ましい。また有機物分については、構成する元素の種類とその組成比により発熱量が変わる。(2.3 バイオマスの組成参照) Table 2.4.2 に代表的なバイオマスと他の有機性燃料の元素分析例と発熱量を示す。バイオマスは石炭、石油に比べて酸素の含有率が高く、炭素、水素の含有率が低いため、単位重量あたりの発熱量が低い。樹木系、草本系のバイオマスでは、炭素、水素の含有率はそれぞれ 45-50%、5-6%で、H/Cmol比が約 2 前後で変動幅が小さい。これは主要構成成分がセルロースやリグニンであり、これらの組成に影響を受けるためである。

Table 2.4.2. Typical elemental compositions and heating values of representative types of biomass, coal, and peat.

Energy source	Cellulose	Pine	Giant brown kelp	Water hyacinth	Livestock waste	RDF	Sludge	Peat	Bitumen
Carbon [wt%]	44.44	51.8	27.65	41.1	35.1	41.2	43.75	52.8	69.0
Hydrogen [wt%]	6.22	6.3	3.73	5.29	5.3	5.5	6.24	5.45	5.4
Oxygen [wt%]	49.34	41.3	28.16	28.84	33.2	38.7	19.35	31.24	14.3
Nitrogen [wt%]	—	0.1	1.22	1.96	2.5	0.5	3.16	2.54	1.6
Sulfur [wt%]	—	0	0.34	0.41	0.4	0.2	0.97	0.23	1.0
Ash [wt%]	—	0.5	38.9	22.4	23.5	13.9	26.53	7.74	8.7
Heating value [MJ/dry-kg]	17.51	21.24	10.01	16.00	13.37	12.67	19.86	20.79	28.28

With respect to moisture content and other properties, elemental analysis results were all obtained in dried condition.

2.4.3 計算式による発熱量の推算法

Table 2.4.1 と Table 2.4.2 に掲げた各種バイオマスの発熱量は、いずれも実測値である。原料の元素分析値などから、計算により発熱量を推算する試みがされている。計算式はいくつかが提示されており、一例を示す。

$$\text{高位発熱量 (HHV) [MJ/dry-kg]} = 0.4571(\%C \text{ 乾燥基準}) - 2.70$$

Table 2.4.3 に、上記計算式で求めた発熱量と実測の発熱量の比較を掲げる。汚泥（バイオソリッド：汚泥固化物）を除きよい一致を示している。

Table 2.4.3. Comparison of the measured and calculated heating values of biomass.

Feedstock biomass	High heating value: measured	High heating value: calculated	Error [%]
Cellulose	17.51	17.61	+0.59
Pine	21.24	20.98	-1.23
Giant brown kelp	10.01	9.94	-0.70
Water hyacinth	16.00	16.09	+0.54
Cattle manure	13.37	13.34	-0.19
Biosolids	19.86	17.30	-12.90
Bitumen	28.28	28.84	+1.98

参考文献

Ogi, T. in “Biomass Handbook”, Japan Institute of Ed., Ohm-sha, 2002, PP.16-19 (in Japanese)

2.5 炭素循環

2.5.1 地球上の炭素収支

地球上の炭素は大気圏、海洋、陸上植生、地圏という貯蔵庫に蓄積・存在している。また、炭素はこれらの貯蔵庫の間で気体、無機炭素、有機炭素と形を変えながら、出入り・循環している。IPCC（気候変動に関する政府間パネル）第4次レポート（2007）によると、1990年代においてこれらの圏間での正味の交換量（収支）は、化石燃料消費とセメント生産において炭素換算で64億トンC、土地利用の変化で16億トンCの両者の合計80億トンCが年々大気に放出され、陸上植物生態系に26億トンC、海洋に22億トンCで合計48億トンCが大気から吸収されて、差し引き32億トンC（=80-48）が大気中に残留していることになっている（Table 2.5.1 参照）。これらの数値は IPCC

が調査研究成果をまとめて、現時点で相互に矛盾の無いように調整したもので、化石燃料消費とセメント生産に伴う放出量、大気への残存量はかなり正確であるが、その他の交換量については±50%以上の誤差があるといわれている。さらに、このような圏間での移動は地球的規模での循環の一過程をなすものであるが、同時に陸上、海洋生態系ではそれぞれの生態系内での炭素循環があり、炭素収支はそれぞれの生態系の活動の指標であり、気候変動に応じた環境変動により変化する。京都議定書が2005年2月に発効し、適切な森林管理により森林の炭素貯留量を増やし、それを炭素削減目標量に組み込むことになる。このために、全球の炭素収支、バイオマス生産において、森林生態系（森林生物部と土壌を含む系）での炭素貯留量、炭素循環の正確な把握が必要となっている。

Table 2.5.1. Global carbon budget. By convention, CO₂ fluxes leaving the atmospheric reservoir (i.e. “CO₂ sinks”) have a negative sign. Numbers in parentheses are ranges. Units: GtCyr⁻¹.

NA: No information available to separate. (IPCC 4th assessment report, 2007)

	1980s	1990s	2000–2005
Atmospheric increase	3.3±0.1	3.2±0.1	4.1±0.1
Emissions (fossil fuel + cement)	5.4±0.3	6.4±0.3	7.0±0.3
Ocean-atmosphere flux	-1.8±0.8	2.2±0.4	-2.2±0.4
Land use change flux	1.3 (0.3 to 2.8)	1.6 (0.5 to 2.8)	NA
Residual land sink	-1.6 (-4.0 to 0.3)	-2.6 (-4.3 to -1.0)	NA

2.5.2 森林生態系における炭素循環

世界の森林生態系の生物部の3300億トンCに対して、土壌にはその2倍強の7800億トンCの炭素が貯蔵されているといわれている（ここではDixson他、1994の数値を示すが、研究者によりばらつく）。さて、森林が光合成作用によって大気中のCO₂を取り込み、有機物を生産することは良く知られているが、この生産量の大きな部分は森林自体の呼吸により消費されて、CO₂として再び大気に戻る。残りの部分は森林の生物部（幹、葉、枝、根）の増加となる。森林の生物部の一部は枯死し、落葉・落枝となって地面に落ち、土壌中に有機炭素として貯蔵される。他方、土壌に貯蔵さ

れる土壌有機物の分解速度（土壌呼吸）は林齢や温度・土壌水分などに依存しており、将来の温暖化気候下で土壌呼吸量が増大して、大気中のCO₂濃度を高める可能性がある。また、伐採された木の幹は木材として利用され、家などの材は長期にわたって貯蔵されることになる。このように土壌を含む森林生態系の炭素収支には光合成量、植物呼吸量、土壌呼吸量などの多くの要因が関係しており、まだ十分に解明されていない。特に、将来の気候温暖化や土地富栄養化などによる森林成長促進効果、気温上昇に伴う有機物分解速度などの増大の影響などの定量的解明が急がれる。

2.5.3 炭素収支モデル

長期的な視野に立った科学的な炭素管理を行う上では、これらの研究成果、陸域植生統計データを基礎に多様な陸域生態系でのCO₂循環過程を解明し、気候、CO₂濃度等の環境変化に対する森林等陸域生態系の応答を含むプロセスモデルの構築が不可欠な課題である。また、プロセスモデルと人工衛星データ、陸域植生統計資料等を組み合わせて、陸域生態系モデルのスケールアップが図られている。さらに陸域生態系モデルとグローバル/リージョナルスケールの物質循環モデルを統合して、現状および将来における世界の陸域生態系の炭素収支・植物生産における役割を解明する試みが今始まっている。

陸上生態系の炭素収支モデル Sim-CYCLE によるグローバルな炭素動態のシミュレーション（及川武久、2002）では、現状と70年後の土壌、植生（大気濃度が70年間で350から700 ppmに2倍化の条件、植生分布の変化は考慮しない）それぞれの炭素プールが Fig. 2.5.1 に示すように現状の642.3 GtC、1495.1 GtCから835.1、1559.0へと増大して、植物総生産量（GPP）、純一次生産量（NPP）、植物呼吸（AR）、土壌有機物分解（HR）、植物生態系の炭素固定量（NEP）も現状から気温の上昇、CO₂濃度の上昇により増大している。

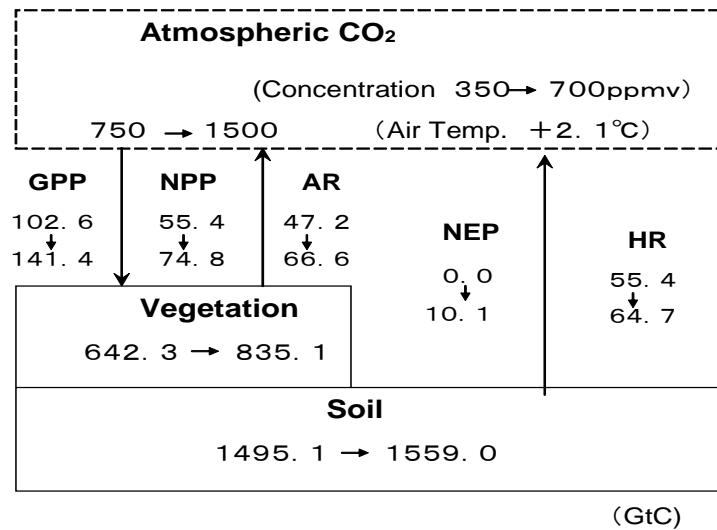


Fig. 2.5.1. The changes of carbon balances and stocks from present to future condition (after 70 years under twice time of CO₂ atmospheric concentration and higher air temperature by 2,1°C) estimate by Sim-CYCLE model. (T. Oikawa, 2002)

参考文献

Dixon,R.K.,Brown,S.,Houghton,R.A.,Solomon,A.M.,Trexer,M.C. and Wisnieski,J.,Carbon pools and flux of grobal forest ecosystems. Science 263,185-190.(1994)

IPCC Fourth Assessment Report, 2007: A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Oikawa, T. Land ecosystem response to global warming (in Japanese), Suuri-Kagaku, 2002, No.470, 78-83.

2.6 木質系バイオマス

2.6.1 木質系バイオマスの種類と特徴

森林から生産されるバイオマス原料には副産物として得られる場合と、バイオマス原料を主産物とする場合の2つがある。副産物として活用されるのは、苗木を植栽して十数年経過後に各樹木の生育空間を維持するために間引きした木である。間伐木は商品価値が低いことから、通常は林内に伐倒・放置されている。また、我が国の人工林は植栽後 50~70 年で伐採される。1 m³ の丸太が立木から生産されるときに 0.36 m³ の枝葉と 0.22 m³ の末木や曲がり部分が林地に残される。これら

未利用材はバイオマス原料としての活用が期待されている。

1960年代まで我が国の家庭燃料には薪炭材がかなり使用され、木材供給量の3割近くが薪炭材であった。これらの供給元は里山の広葉樹林であったが燃料革命によって化石燃料にとって代わられた後は、こうした里山林は放置されたままになっている。パルプ材生産のために使用されていた広葉樹林も近年の円高によってパルプ資源が海外にシフトし、80年代後半から利用されなくなった。薪炭材やパルプ材生産目的で管理されてきた広葉樹林は工業用材としての価値がないため、新たな利用目的を見つけることが課題となっており、バイオマス・エネルギー源として活用される可能性は十分にある。これとは別に、バイオマス原料の生産そのものを目的として、ヤナギやポプラ、カンバのように成長が早い樹種を植栽したり、自生したものを意識的に育成する場合がある。スウェーデンではヤナギを農地に植栽し、カナダでは天然に生えてくるカンバをバイオマス資源として利用している。また、熱帯ではユーカリやアカシアをバイオマス原料として植栽している。

2.6.2 成長速度

バイオマス原料のもっとも大きな特徴は再生可能なエネルギー源という点である。バイオマス個体はエネルギーとして利用される段階で化石燃料と同じく炭素を大気中に放出するが、再生する段階で大気中の炭素を光合成により取り込み、森林生態系内に蓄積することによりゼロエミッションに近いエネルギー供給、利用のサイクルを実現する。再生に要する時間はバイオマス固体の成長速度によって決まるが、木質系バイオマスは気温や雨量、土壌養分といった環境要因や樹種、遺伝特性によって成長速度が決まる。一般に低緯度地域では成長が早く、緯度が高くなるにつれ成長速度が遅くなる。例えば代表的な早生樹種であるユーカリやアカシアは東南アジア地域で ha あたり乾重量で毎年 10 t~30 t 成長している。これに対し、日本の代表的な人工林樹種であるスギの乾重量での成長量は ha あたり毎年 4 t~7 t である。また、森林バイオマスは植栽後の若い時期は成長が早い但其後は成長速度が低減していくため、バイオマス生産林のように木材の質よりも収穫量が問題になる場合は、平均年成長量が最大になる時期に収穫する (Table 2.6.1、Table 2.6.2)。広葉樹林をバイオマス原料生産目的で経営する場合であれば、日本の場合は林齢が 30 年前後の時に収穫するのがもっとも効率がよい。

Table 2.6.1. Accumulated biomass carbon of manmade forest.

age	Biomass weight (ton/ha)
10	13.5
20	59.2
30	105.8
40	145.9
50	172.0
60	189.5
70	198.0
80	203.0
90	206.5
100	208.6

Table 2.6.2. Accumulated biomass carbon of hardwood forest.

age	Biomass weight (ton/ha)	Mean annual increment (ton/ha)
10	18.3	1.8
20	41.6	2.1
30	59.9	2.0
40	74.0	1.9
50	85.2	1.7
60	93.7	1.6
70	100.0	1.4
80	104.9	1.3
90	109.2	1.2
100	112.0	1.1

2.6.3 実用例と現在の使用量

我が国では木質系バイオマスを利用して発電や熱を供給するプラントは多数存在するが、それは製材工場や合板工場、パルプ工場内に設置され、生産されたエネルギーも原則として自社内で消費され外部への販売例は少ない。バイオマス原料も自社内で発生した工場残材が中心で、低質広葉樹材や林地残材を購入してバイオマス発電を行っているケースは少ない。しかし、海外では木質バイオマスによる発電は盛んであり、もっともバイオマスエネルギー利用が進んでいるスウェーデンは、1998年時点でバイオマスエネルギーのシェアは19%である。

2.6.4 バイオマス資源量

FAOの2005年の森林統計によると世界の森林面積は40億ha、1人あたりの森林面積は0.62haであり、これは陸地面積の1/3に相当する。ただ、中国、インドなど温帯地域では人工林の拡大により森林面積が増加しつつあるものの、既存の森林は毎年13百万haずつ減少しており、世界全体で見れば森林の純減面積は730万haである。これとは別に、劣化したり乾燥地帯で疎林状態になった林地が1990年時点では16億haあり、これらの劣化した林を何らかの形で森林に回復させることは、地球環境保全上の重要課題になっている。幹材積に限った木質系バイオマス量は3500億tあり、その1/3は南米に存在している。世界平均では幹だけでhaあたり92tのバイオマス量が存在している。2000年から2005年間の年平均の人工林増加面積は世界全体では280万haであり、世界の人工林面積総計は140百万haである。このうち、早生樹種であるユーカリは10% (1786万ha)、アカシアは5% (832万ha)を占めている。主な早生樹種の幹材積成長量は *Eucalyptus grandis* で15-50m³、*Acacia mearnsii* が14-25 m³、*Pinus radiata* が12-35 m³、*Pinus caribaea* が20-50 m³と日本の人工林の3~10倍近く成長が早い。バイオマスエネルギー利用は地球温暖化の軽減を図ることが目的の一つになっているが、森林が急速に減少している熱帯にバイオマス生産林を造成することにより、地球環境の保全にも貢献することが可能となる。大規模な早生樹の植林を進めると生態面や生物多様性、周辺住民への社会経済的な面への様々な影響が考えられるが、生物多様性など環境に配慮した持続的な森林管理に沿った形であれば、地域との調和を保ちながらバイオマス生産林を造成することは可能である。また、成長が早いことから投資の回収も容易であり、地球環境への適応だけでなくコスト的にも化石燃料と十分に競合できるケースもある。

参考文献

FAO, Global Forest Resources Assessment 2005, FAO, 2006

FAO, Forest Resources Assessment 1990, 7, FAO, 1995

2.7 草本系バイオマス

2.7.1 草本系バイオマスとは

「木質系」に対応することばで、草地に生育するイネ科、マメ科植物などを指す。飼料価値の高い植物は牧草として利用されているが、未利用の野草も多い。また、イネ、ムギ、トウモロコシ、ソルガム、サトウキビなどの食用作物もイネ科植物であり、広義にはこれを草本系バイオマスに含む。さらに稲わらなどの作物残さ（残渣）は、成分的にもバイオマス燃料生産の特徴から見ても草本系バイオマスといえる。一方、タケやササはイネ科植物であるが成分的には木質系に近い。木質系バイオマスよりも成長が早く、短期間に大きなバイオマス生産ができる。また、再生力が旺盛で持続性にも優れ、長期的に低投入で安定生産が可能な草種が多い。例えば、石垣島でギニアグラスを7年間にわたり、年間平均で40 t/ha以上の乾物収量を生産した試験がある。さらに、雑草が示すように劣悪環境にも強く、あらゆる環境に生育する。また、天日乾燥が容易で、バイオマス原料としての適性にも優れる。そのため、食糧生産と競合しない、未来のエネルギー原料用バイオマス資源として注目され、米国で現在、バイオエタノール原料として多年生熱帯牧草のスウィッチグラスが注目を集めている。

草本系バイオマスはイネ科植物とマメ科植物に大きく分類できる。イネ科植物は一年生と多年生に分けることができ、一年生には穀類が含まれ、多年生には牧草が多い。マメ科は草本性、つる性、および木本性の種が含まれ、成分的に草本性バイオマスに含まれるのは草本性とつる性である。根粒菌との共生によって大気中窒素を固定し、窒素肥料の施用を軽減できる特性は、低投入持続型バイオマス生産システムの構築において重要な役割を担うことが予想される。ただ、年間乾物収量は、アルファルファが愛知県で8-17 t/ha、熱帯マメ科牧草が沖縄県石垣島で5-19 t/haであり、イネ科牧草と比較すると低い。

2.7.2 C₃ 植物と C₄ 植物

植物の成長速度は光合成能力と環境要因（日射量と気温など）に支配される。イネ科植物の光合成能力は、C₃植物かC₄植物であるかによって異なり、両者の葉や維管束等の組織構造の違いも大きい。一般に、熱帯牧草に代表される C₄植物は温帯牧草に代表される C₃植物よりも高温高日射条件下でより高い光合成能力を発揮し、最大光合成能力が2倍以上となる。一方、低温低日射条件下ではC₄植物は十分にその能力を発揮できない。

Table 2.7.1に示したように、地上最大の生産量を示すネピアグラスは、プエルトリコで約85 t/haの年間乾物収量を記録している。ハワイでのサトウキビも64 t/haと高く、1日当たり各々232kg/ha、176 t/haとなる。亜熱帯ではサトウキビとギニアグラスのバイオマス生産量が年間約50 t/ha（約140 kg/ha/日）であり、細茎の牧草類が25-30 t/ha（70-80 kg/ha/日）である。温帯では、霜に強い熱帯牧草のバミューダグラスやバヒアグラスが20-30 t/ha（50-80 kg/ha/日）であるが、冬季の低温化では成長しない。一方、温帯牧草は15-26 t/ha（40-70 kg/ha/日）であるが、西南暖地の夏季の高温乾燥条件下では生育が停滞する。ただ、多年生牧草は、一度、耕起と播種を行えば、その後は数年後の更新時まで耕起と播種の作業を行う必要がなく、低投入持続型栽培において重要である。

Table 2.7.1. Biomass of perennial gramineous forages.

Species	DM yield (t/ha/y)	Daily DM (kg/ha)	site
C ₄ species			
Napiergrass	84.7	232.1	Puerto Rico
Guineagrass ³	51.1	140.0	Ishigaki, JP
Sugarcane	49.5	135.6	Okinawa, JP
C ₃ species			
Perennial ryegrass	26.6	72.8	New zealand
Orchadgrass	22.0	60.3	New Zealand
Tall fescue	15.0	41.1	Kumamoto, JP
Timothy	15.0	41.1	Hokkaido, JP

Table 2.7.2. Biomass of annual gramineous crops.

Species	DM yield (t/ha)	Total Days	Daily DM (kg/ha)	Site
C₄ species				
Sorghum	46.6	210	221.9	California
Sorghum (green A)	28.8	190	151.6	Nagano, JP
Maize	34.0	140	245.7	Italy
Maize	27.2	104	261.5	Ohita, JP
C₃ species				
Rice (Akihikari)	19.2	134	221.9	Iwate, JP
Wheat (Akiba-komugi)	14.3	219	65.3	Ibaraki, JP
Oat	16.4	193	85.0	Hyogo, JP
Rye	15.6	195	80.0	Tochigi, JP
Annual ryegrass	14.8	230	4.3	Chugoku, JP

一年生イネ科作物ではトウモロコシやソルガムなどの C₄ 植物である長大型飼料作物は初期生育が早く、5 ヶ月程度で約 17-34 t/ha (132-260 kg/ha/日) と熱帯のネピアグラス以上の 1 日当たり乾物生産量になり、温帯でも夏季に熱帯レベルのバイオマスを生産することが可能である。また、イネは C₃ 植物であるが、温帯では C₄ 植物に匹敵する高いバイオマス生産能力を持つ。一方、ムギ類や一年生温帯牧草は気温、日射量ともに低い冬季の栽培されるためにバイオマス生産量が低く、作付け期間が長いことから 1 日当たりの乾物生産量は夏作飼料作物の 1/3 以下である。

2.7.3 草本系バイオマスの資源量

草本系バイオマスは、熱帯サバンナでも熱帯雨林よりも現存バイオマス資源量は少ない。しかし、根圏の生態系が豊かで、草食動物に消費されながら旺盛に生育することから、年間バイオマス生産量は熱帯雨林に匹敵し、大気中二酸化炭素の削減に関して熱帯雨林に勝るとも劣らない重要な役割を果たしている。

草本系バイオマスは直接燃料として利用可能であるが、ガス化合成メタノール生産やセルロースを糖化してエタノール発酵させる技術の進歩にともない、欧米諸国や我が国で草本系バイオマスへの期待が高まっている。

我が国のイネ科作物残さ量（乾物重）は、稲わらともみがらが年間 1,895 万 t、大麦や小麦栽培

から 190 万 t、サトウキビから、燃料用のバガスを除いて約 50 万 t と推定される。さらに、中山間地や離島の放棄地 56 万 ha、調整水田 7.9 万 ha に年間 40 t/ha、他の未利用地で年間 5t あるいは 20 t/ha の牧草栽培をした量が 3,208 万 t となる。これを合計した我が国に存在する草本系バイオマス生産可能量、すなわち上記すべてから生じる草本系のバイオマス量は少なく見積もって 5,343 万 t となる。ただし、現在、作物残さは一部家畜飼料として利用されている。

2.7.4 スイッチグラス

(a) スイッチグラスとは

学名 : *Panicum virgatum* L. ; 英名 : switchgrass

草高 90–150 cm、葉長 15–45 cm、葉幅 0.6–1.3 cm、稈が粗剛で根茎と短い地下茎が発達した多年生熱帯牧草。原産地はアメリカでほとんどの地域で自生し、グレートプレーン中央と南部で重要な牧草。比較的湿潤で肥沃な土壤に適する。茎葉収量が高く、生育期間中の飼料価値は高いが、出穂期以後には低くなる。年間乾物収量は、通常、15 t/ha 程度であるが、30 t/ha 以上というデータもある。採種量は散播の場合 230 kg/ha、条播の場合 690 kg/ha になる。種子千粒重は 1.07–1.22 g で他の熱帯牧草に比べて種子が大きい。



Fig. 2.7.1. Switchgrass Trial (USDA-ARS, El Reno, OK, USA, courtesy of Dr. B. Venuto)

(b) バイオマス原料としてのスイッチグラスの利点

スイッチグラスは、糖化と発酵によるエタノール生産原料として米国で最も注目されている熱帯牧草である。米国には「草の海」と呼ばれる広大なグレートプレーンが存在する。例えば、16 t/ha の乾草が収穫され、乾草 1 t から 300 L のエタノールが生産されると仮定すると、原料価格から試算したエタノール 1 ガロン(3.8L)当たりの生産コストはトウモロコシの 0.7–1.21 ドルに対して、スイッチグラスは 0.51–0.89 ドルと低い⁴⁾。この論文は、米国で、かつて荷馬車用の馬の飼料生産に利用された 3,300 万 ha は穀物生産に影響を与えず、バイオマス生産の場として利用可能としている。ここで、スイッチグラスを栽培すれば 5 億 2000 万 t のバイオマスが生産できる。スイッチグラス栽培はトウモロコシなどのエロージョン（土壌浸食：地表面が降雨によって削られる土地の荒廃）を誘発する穀物生産よりも環境保全に適するという利点がある。広大な耕地を持つアメリカ

では、二酸化炭素を発生する耕起を少なくできる草本性バイオマス生産が環境保全効果を持つという側面が重要視されている。一度定着すれば、我が国のスキのように、低投入で持続的な栽培が可能である。ただ、種子に休眠性があり、初期生育が遅いことから、雑草害等で一年目の栽培に失敗することがある¹⁾。なお、収量は、我が国の多年生温帯牧草類と大差なく、我が国で栽培する利点は低いと考える。

(c) スイッチグラスの品種

代表的な品種を以下に示す。

(1) Alamo(アラモ)

テキサス州の Soil Conservation Service(SCS)とテキサス州農業試験場が共同で1978年に育成した品種で、テキサス州 George West 周辺での収集系統に由来する。低地型で「Blackwell」よりも出穂が1,2ヶ月遅く、大型で葉幅が広く、生産量が高い。耐塩性は中程度でアイオワ州からフロリダ州まで年間降水量が630mm以上のあらゆる土壌条件に適する。

(2) Blackwell (ブラックウェル)

カンザス州の SCS で育成され、1944年に登録された、オクラホマ州 Blackwell 自生の1個体に由来する品種。草高は中程度の高地型(upland type)で、稈が太い。初期生育が旺盛で、年間降水量が500mm以上のカンザス、オクラホマ、ネブラスカ州南部およびテキサス州北部に適する。

(3) Caddo (カッド)

オクラホマ農業試験場において、オクラホマ州中部での収集系統を母材として育成した品種で1955年に登録された。草高の高い高地型で、葉部割合と収量が高く、さび病に抵抗性を示し、過放牧にも耐える。オクラホマ州とカンザス州に適する。

(4) Cave-In-Rock (ケイブインロック)

ミズーリ州の SCS がミズーリ州農業試験場と共同で、イリノイ州 Cave-In-Rock での収集系統を母材として育成した品種で、1973年に登録された。初期生育と耐倒伏性に優れ、耐病性の強い「低地型(lowland type)」で、耐湿性と耐旱性を備えている。アイオワ州、カンザス州、ミズーリ州やミシシッピ州などに適する。

(5) Dacotah (ダコタ)

北部グレートプレーン研究所(Northern Great Plains Research Laboratory)において、ノースダコタ州 Morten 郡での収集系統を母材として、数世代放任授粉を行った後に選抜された10個体に由来する品種で、1989年に登録された。出穂時期は「フォレストバーク」よりも27日、「ブラックウェル」、「ケイブインロック」、「パスファインダー」よりも約45日日早い。草高が低く、耐乾

性に優れる。アメリカ北部、すなわちノースダコタ州、ミネソタ州、モンタナ州に適する。

(6) Forestburg (フォレストバーグ)

ノースダコタ州の SCS が北部グレートプレーン研究所と共同で、サウスダコタ州 Forestburg での収集 4 系統を母材として、選抜した品種であり、1987 年に登録された。耐寒性、永続性と種子収量が非常に優れ、他品種よりも早生である。アメリカ北部では「ダコタ」や「ネブラスカ 28」よりも収量が高い。モンタナ州、ノースダコタ州、サウスダコタ州、ミネソタ州に適する。

(7) Kanlow (カンロー)

カンザス州農業試験場において、オクラホマ州 Wetumka 周辺での収集系統を母材にして選抜した 200 個体に由来する品種で、1963 年に登録された。低地型で草高が高く、茎が太くて粗剛であるが生育旺盛で耐湿性が高く、低湿地向き品種であるが、乾燥が厳しくなければ高地でも良く生育する。乾燥地帯では、「カッド」や「ブラックウェル」に劣る。

(8) Pathfinder (パスファインダー)

ネブラスカ州農業試験場において、ネブラスカとカンザス州の自殖系統を母材として育成された品種で、1967 年に登録された。高地型晩生で耐乾性が強く、生育旺盛で葉部割合が高く、さび病に強い。ネブラスカ州とその周辺地域に適する。

(9) Shelter (シェルター)

ニューヨーク州の SCS においてウエストバージニア州での収集系統を母材として育成し、1986 年に登録された。「カンロー」に次いで稈が太く、葉部割合が低い。「ブラックウェル」よりも初期生育は劣るが、草高が高く、やや出穂が早い。アーカンサス州以北、以東のアメリカ東部に適する。

(10) Trail Blazer (トレイルブレイザー)

ネブラスカ州農業試験場において、ネブラスカ州とカンザス州での収集系統を母材にして育成した合成品種で、1984 年に登録された。高地型で乾物収量を犠牲にすることなく消化性が高くなり、「パスファインダー」と出穂期が同じでそれよりも乾物消化性が高い。グレートプレーン中部およびアメリカ東部の州に適する。

その他、「Greenville」、「Nebraska28」、「Summer」などが市販されている。

参考文献

Long, S.P. et al. (eds.): Primary productivity of grass ecosystems of the biosphere, 1-267, Chapman & Hall (1992)

Nakagawa, H.: Development and cultivation of forage grasses and crops for clean bio-methanol

- production to keep global environment, *Farming Japan* Vol. 35-2:22-31(2001)
- Nakagawa H. and Momonoki T.: Yield and persistence of guineagrass and rhodesgrass cultivars on subtropical Ishigaki Island, *Grassland Science*, Vol. 46, pp. 234-241 (2000)
- Sakai, M., and Nakagawa H.: A new biofuel towards 21st century, The Chemical Daily Co. Ltd., (in Japanese), pp. 1-197
- Burnhart, S., Management guide for the production of switchgrass for biomass fuel in Southern Iowa, <http://www.extension.iastate.edu/Publications/PM1710.pdf>, (2003)
- Nakagawa, H., Forage crops in tropics, Association for International Cooperation of Agriculture and Forestry, Tokyo (in Japanese) (1998)
- United States Department of Agriculture, Grass varieties in the United States, CRC Press, Boca Raton. (1995)
- Vogel, P. K., Energy production from forages (or American Agriculture – back to the future), *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 51, No. 2, 137-139. (1996)

2.8 澱粉・糖生産型作物

2.8.1 澱粉・糖生産型作物の概説

澱粉・ショ糖は、発酵させてエタノール等のバイオ燃料に変換できるが、一方で、その絞り粕等の廃棄物に含まれるセルロース、ヘミセルロース等の繊維性糖質は、グルコース等の発酵原料への加水分解が難しい。

澱粉生産型植物としては、トウモロコシ（トウキビ、ナンバンキビ；*Zea mays* L.）、コムギ（小麦；*Triticum* L.）、イネ（稲；*Oryza sativa* and *Oryza glaberrima*）、ジャガイモ（馬鈴薯；*Solanum tuberosum* L.）、サツマイモ（甘藷、薩摩薯、唐薯；*Ipomoea batatas* (L.) Lam.）、オオムギ（大麦；*Hordeum spontaneum* C. Koch（野生二条大麦）；*H. vulgare* L.（六条大麦）；*H. distichum* L.（二条大麦））、キャッサバ（タピオカ；*Manihot esculenta* Crantz）、サゴヤシ；*Metroxylon sagu* Rottb.）等がある。また、糖生産型植物としては、サトウキビ（砂糖黍、甘蔗；*Saccharum officinarum* L.）及びテンサイ（甜菜、砂糖大根；*Beta vulgaris* var. *altissima*）が主要作物である。

品種改良、栽培技術進歩による単位収量増加により、澱粉生産型作物の三大穀物（トウモロコシ、コムギ、イネ）の生産量は年々増加し、2004年には各々7.25億トン、6.33億トン、6.06億トンの計19.63億トンに昇り、穀物全体22.72億トンの約86%を占めるに至っている（Fig. 2.8.1）。し

かし、従来技術の限界のため、これ以上の生産量増加はほぼ望めないと見られている。今後は、遺伝子組換え技術等により耐寒性、耐乾性、耐塩性等を植物に付与するなどして、栽培面積を拡大する方向性が必要であろう。また、砂糖生産型作物の主流、サトウキビの生産量は年々増加し、13億トン強(2004年)に達しているが、テンサイの生産量は約2億トンで推移している(Fig. 2.8.2)。これら植物の生産量総計は、45億トン強(2004年)で、世界人口63.7億人(2004年)の平均栄養摂取量2808kcal/人/日(2003年)に大きく貢献している。しかし、アジア、アフリカの人口爆発地域を中心に約8億人が飢餓に苦しんでおり、これら植物のエネルギー資源作物への更なる転用は道義的に難しい。今後は、これら作物の遺伝子組換え作物等による栽培面積拡大・単位収量増大で食料資源量を増強しつつ、バイオエネルギー資源としての栽培を推進し、更には、抽出残渣廃棄物等のエネルギー変換技術を開発することが重要である。

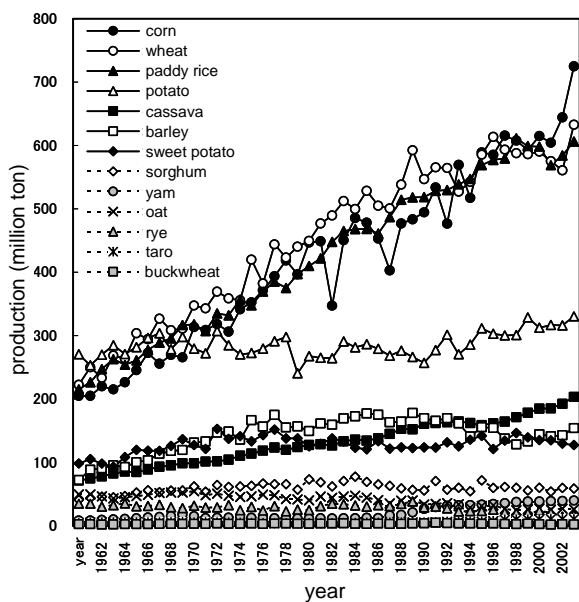


Fig. 2.8.1. World production of starch crops.

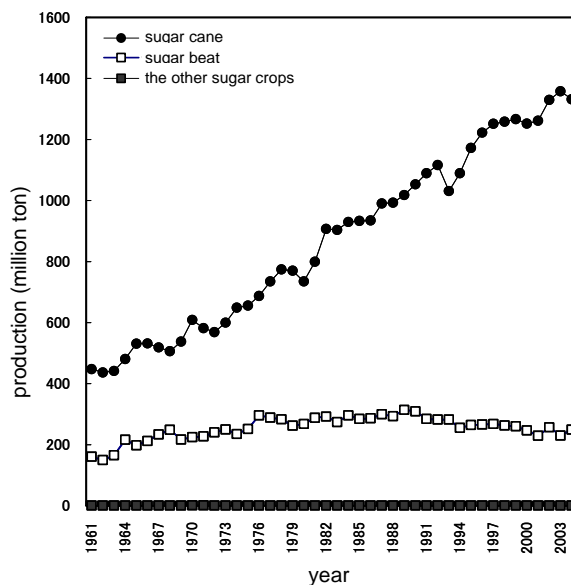


Fig. 2.8.2. World production of sugar crops.

(ref. FAOSTAT: <http://www.faostat.fao.org/default.aspx>)

2.8.2 キャッサバ

低木のキャッサバ (*Manihot esculenta*) は、熱帯から亜熱帯にかけて世界の広い地域で栽培されている。2006年の世界の総生産量は2.26億トンであり、栽培面積は1860万ヘクタールにおよぶ。最大の生産国はナイジェリアで、以下ブラジル、タイ、インドネシアと続く(Fig. 2.8.3)。タイ

におけるキャッサバは、ヘクタール当たり平均 21 トンと世界最高の収量があり、110 万ヘクタールの面積で栽培されている (Fig. 2.8.4)。

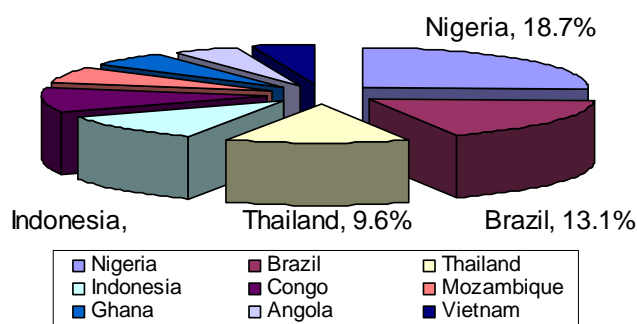


Fig. 2.8.3. World leading countries of cassava production in 2006.

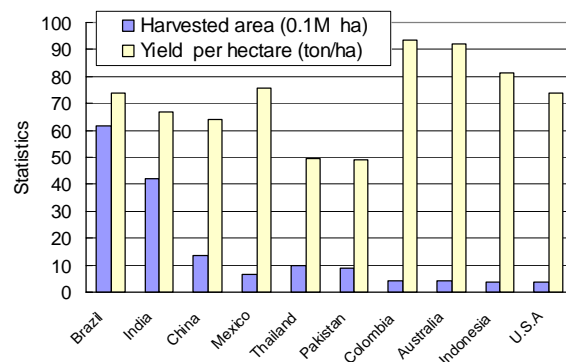


Fig. 2.8.4. Harvest area and yield of cassava.

キャッサバの植え付けは、切断した茎をやや傾けて地面に挿すことによって行われる。低肥沃な土壌でも良く育ち、耐乾性も有する。デンプンが集積した塊根は、植え付けからだいたい 12 ヶ月後に人力によって収穫される。しかし、早い場合は 8 ヶ月後でも収穫可能であり、遅い場合は 24 ヶ月後に収穫することもある。塊根のデンプン含量は、タイ国では 25%程度である。タイ国では、キャッサバの収量は品種改良によって緩やかに増加しており (Fig. 2.8.5)、さらに、ヘクタール当たり 30 トン以上の高収量が見込まれる、新品種のラヨン 9 号が 2006 年から登場している。

多くの品種において塊根はシアン化合物を含むので、キャッサバ粉末を水に浸すことによってシアン化合物を取り除く必要がある。キャッサバは、主要な炭水化物源として多くの熱帯諸国で食用されており、飼料やデンプン原料としても利用されている。さらに、キャッサバデンプンを使ったバイオエタノール生産の開発が進められている。タイ国における 2007 年のキャッサバ生産量は 2700 万トンであり、食料、飼料、燃料としての利用内訳を流れ図 (Fig. 2.8.6) で示す。

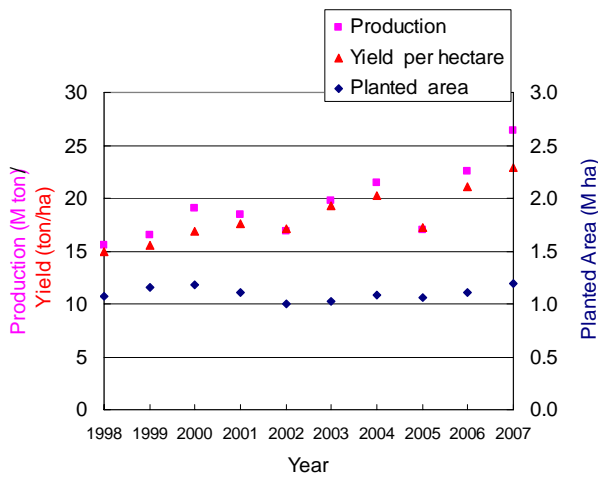


Fig. 2.8.5. History of cassava statistic in Thailand.

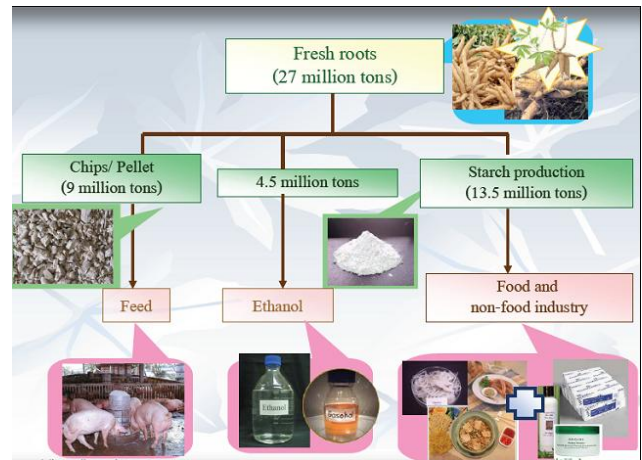


Fig. 2.8.6. Uses of cassava in Thailand.

2.8.3 サトウキビ

サトウキビは背の高い多年生草本で、砂糖生産のために熱帯から亜熱帯にかけて世界の広い地域で栽培されている。Saccharum 属であり、多くの栽培品種は、*S. officinarum* との交雑種である。2006年の世界の総生産量は13.9億トンであり、栽培面積は2040万ヘクタールにおよぶ。最大の生産国はブラジルで、以下インド、中国、メキシコ、タイと続く (Fig. 2.8.7)。タイにおける収量はヘクタール当たり平均49.4トンであり、97万ヘクタールの面積で栽培されている (Fig. 2.8.8)。

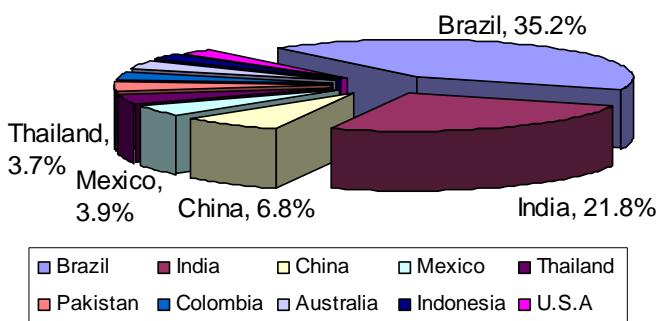


Fig. 2.8.7. World leading countries of sugarcane production in 2006.

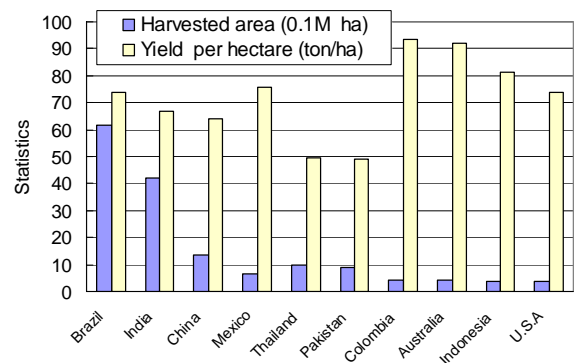


Fig. 2.8.8. Harvest area and yield of sugarcane.

芽が着いている切断した茎を種苗として植える。サトウキビは C_4 植物なので光合成能力が高い。

最適温度は 20 度から 35 度であり、1200 mm 以上の降雨を必要とする。植え付け後 9 から 14 ヶ月後に人力あるいは機械で収穫する。サトウキビは一度植えると、切り株から新しい茎が生えるため、何度も収穫することができ、これを株出し栽培と言う。収穫時に除かれる鞘頭部を飼料として用いる地域もある。10 年間に渡るタイにおける栽培では毎年異なる気象条件のため、生産量は予測不能な程、変動している (Fig. 2.8.9)。

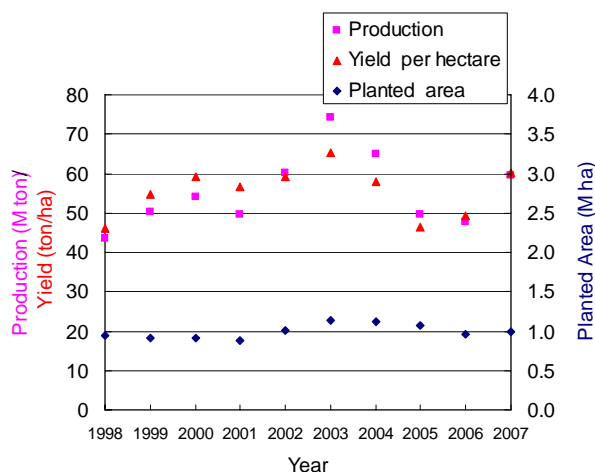


Fig. 2.8.9. History of sugarcane statistic in Thailand.

製糖工場の副産物として、バガス、砂糖汁の残さであるフィルターケーキ、糖蜜が産出される。

大まかに言って 1 トンのサトウキビ原料から、105 kg の砂糖、500 kg の水、280 kg のバガス、30 kg のフィルターケーキ、55 kg の糖蜜が得られる。バガスは砂糖汁を圧搾した後に残った繊維であり、一般的には製糖工場のボイラーで水蒸気を作るために燃やされる。この結果として、製糖工場のエネルギーは自給される。フィルターケーキの典型的な使用法は肥料である。最も価値のある副産物は糖蜜であり、アルコールやグルタミン酸ナトリウムの原料となる。ブラジルで生産されるサトウキビの約半分はエタノール生産用であり、糖蜜だけでなく砂糖汁も用いて作られたエタノールをガソリンと混ぜたガソホールが、移動用燃料として使われている。現在、バイオエタノール生産用作物として、サトウキビは経済的および環境的に最も優位な作物である。

参考文献

S. Nivitchanyong, Alternative Energy Cluster, National Metal and Materials Technology Center: MTEC (siriluck@mtec.or.th)

2.9 油生産型バイオマス

2.9.1 油生産型バイオマスとは

食品、工業用原料の他、軽油代替燃料としてのバイオディーゼル原料として使用される油脂（主成分は脂肪酸とグリセリンとのトリエステル）を種子又は果肉中に多量に蓄積する植物を言う。主な油生産型バイオマスの例は以下の通り。

(a) 大豆（英名：Soybean、学名：*Glycine max* Merrill）

米国、ブラジル、アルゼンチン、中国が主な産地。大豆油はオレイン酸（20-35%）、リノール酸（50-57%）、リノレン酸（3-8%）からなり、広く食用として用いられている。また、不乾性油としてペイント、ワニスなどの工業用原料としても重要。

(b) アブラナ（英名：Rape、学名：*Brassica campestris* L）

寒冷地での栽培適性があるため、アジアから欧州まで広範な地域で栽培されている。主な産地は中国、カナダ、インド、ドイツ、フランスなど。アブラナの種子から取れるなたね油はオレイン酸（55-59%）、リノール酸（21-32%）、リノレン酸（9-15%）からなり、主に食用油として利用されている。

(c) アブラヤシ（英名：Palm Tree、学名：*Elaeis guineensis* Jacq）

マレーシア、インドネシアが主な産地。アブラヤシは1年に何回も収穫できる多年性植物のため、油生産型バイオマスの中で最も生産性が高い。アブラヤシから取れるパーム油はパルミチン酸（35-38%）、ステアリン酸（3-7%）などの飽和脂肪酸を多く含み、食品用途だけでなく、脂肪酸、石鹼、界面活性剤などの工業用原料に広く使用されている。

2.9.2 油脂の製法

植物の種子や果肉を圧搾または抽出すると油脂が得られる。

(a) 圧搾法

ロールミルで粗砕・圧扁してフレーク状とし、75～85℃に加熱した後、エキスペラーなどで圧搾し油脂を取り出す方法。菜種などの油脂含有量が多いものに用いられる。

(b) 抽出法

ヘキサンなどの溶媒を用いて油脂を抽出する方法。大豆油などの油脂含有量の低い原料に対して用いられる。

2.9.3 油生産型バイオマスの資源量

油生産型バイオマスの資源量は、油糧種子の生産量、および搾油後の油脂生産量で見ることができる。世界の油糧種子の生産量（2005/06）は全体で約5億7000万トン（但し、パーム果実の生産量は、パーム油の生産量とパーム果実の油脂含有量（平均20%）から推定）、一方、植物油脂の生産量（2005/06 予測）は世界全体で約1億2000万トンとなっている。

Table 2.9.1. World oil seed and fat & oil production (2005/06, million ton)

	Soybean	Rapeseed	Sunflower	Coconut	Palm kernel	Palm	Others	Total
Oil seed production	220	43	30	5.3 (Copra)	9.4	180 (Fruit)	78.3	566
Fat & oil production	34.8	17.7	10.5	3.3	4.1	35.2	16.3	121.9

2.9.4 バイオディーゼル

油脂をメタノールでエステル交換して得られる脂肪酸メチルエステルは発熱量、粘度、セタン価などの物性が軽油に類似していることから、軽油代替燃料として使用されている。

バイオディーゼルの原料としては、EUでは菜種油が、米国では大豆油が、また東南アジアではパーム油が主に使用されている。特にEUでは2002年頃からバイオディーゼルの普及が始まり、2005年にはその生産量は400万トンに達し、2010年には1000万トンの需要が予測されている。

2.9.5 アブラヤシ

アブラヤシ (*Elaeis guineensis*) は西アフリカ原産で、まず観賞植物としてマレーシアへ持ち込まれた。1917年に最初の商業的作付けが、セランゴール州のテナマラン農園で始められ、マレーシアにおける広大なアブラヤシ農園とアブラヤシ産業の基盤となった。1960年代後半に、土地を持たない農民および小自作農の貧困を根絶する手段として政府は、アブラヤシ作付け用の土地設定計画を導入した。現在、マレーシアのアブラヤシ農園の大部分は農園管理システムと小自作農計画に基づいており、2006年には4百万ヘクタール以上の土地でアブラヤシを栽培し、16百万トンのパーム油を生産している。

アブラヤシは、同じ樹木に雌雄の花を持つ作物である。各樹木は、1房あたり1000個を超える小果実を持つ10~20kgの重量の12~20個の房（通常、新鮮果実房（FFB）と呼ぶ）を毎年生産する。

各小果実球形または細長い形状である。一般的に、小果実は暗紫色またはほとんど黒色であり、熟すと橙赤色になる。各小果実は、肉厚の中果皮で囲まれた殻（内果皮）内の硬い実（種）から成っている。アブラヤシは2種類の油を生産する。中果皮からパーム油原油、実または種からパーム種子油が得られる。若い木や成長した木の幹は、葉状体で包まれており、やや粗い外観である。古い樹木は、枯れて落ちた葉状体により残された傷跡は別として滑らかな幹を持っている。

アブラヤシの樹木は、3歳になった後に結実する。アブラヤシの樹木は25～30歳になるまで結実するが、ほとんどの経済的寿命は5～15年である。樹木が高くなり過ぎると（最大20 m）、一般的に新しい樹木や栄養系による再移植のため伐採される。マレーシアでは、*dura*と*pisifera*の交配種である*tenera*品種が主に植樹される。*tenera*品種は、1年に1ヘクタール当たり約4～5トンのパーム油原油（CPO）と約1トンのやし種を産する。それぞれ2.15、1.50、および0.75ヘクタールを必要とする大豆、ひまわり、および菜種と比較してアブラヤシは最も効率的であり、1トンの油を生産するためにわずか0.25ヘクタールを必要とするのみである。

2.9.6 ココナツ

(a) 植物分類法

ココナツやし (*Cocos nucifera*) は、モクレン植物門、ユリ綱、ヤシ目、ヤシ科、ココス属に属す。

(b) 起源

ココナツの起源には異なる2つの見方がある。一説では、ココス属のいくつかの種は米国でのみ発見されており、米国でのココナツの発生は記録された歴史に先行しているため、起源は米国ということである。もう一説では、ニュージーランドのニューオー克蘭ドでの鮮新世堆積物でのココス種の核の発見、米国よりも多様なより広範なココナツの東南アジアでの存在、および他の理由が示すようにココナツの起源はアジアであるということである (Banzon, 1982年)。

(c) 説明

初期のスペインの探検家がココと呼んでおり、それは「猿の顔」を意味する。なぜならば、毛深いナツ上の3つのくぼみ（目）が猿の頭と顔に似ているからである。*Nucifera*は「ナツの結実」を意味している。ココナツやしは、一般的に多年生植物と説明される。ココナツやしの幹は長く、幹の上部から多くの枝葉を出し、緑の群葉と目立たない白い花を持つ。さらに、茶色の果実を着ける。開花が最も盛んな時期は明瞭でなく、果実と種の生成は年間を通じて始まり、年間を通じて継続する。葉は毎年保持される。ほとんどの他の植物と比べて、ココナツやしの寿命と生育速度は中

程度である。一般的なココナツやしは成熟すると約 20 m の高さになる。

(d) エコロジ

ココナツは日光を好む植物であり、光合成のための十分な日光を必要とする。27℃の平均気温で最も良く成長し、低温に弱い。年間降水量が 1,300~2,300 mm の場合、最も良く成長することも観察されている。水はけが良い場合には、3,800 mm 以上でも良く成長する。多湿性の気候で非常に良く成長すると言える。ココナツに最も適した土壌は、砂壤土やシルト質壤土あるいは団粒構造を持つ粘土質土壌などの肥沃な土壌である。

(e) 結実

さまざまな品種がさまざまな年齢で結実する。背の低い品種は植樹後 3~4 年で結実を始める一方で、背の高い品種は 5~7 年で結実を始める。日光と降雨と気温の組み合わせによって、収穫時期は 1 年のうちで異なった時期になるが、高い収量が得られるのは 3 月から 6 月にかけての収穫であることが、研究によって示されている。

(f) 果実

ココナツの果実は、種子を一つだけ持つ実である。外側の「外皮」は、始め緑色をしているが、採取して乾燥すると茶色になる。果実外皮の内部には中果皮があり、維管束組織で満たされている。外皮の繊維は「コイア」と呼ばれており、マットおよびロープの製造に使用される。食料雑貨品店で我々が購入するのはココナツ果実内部の「石」であり、硬い「殻」と内果皮と殻に包まれた種子を持つ。殻は容器として使用され、職人が装飾品を作るために広く使われている。次に種子の薄い被膜があり、それから白い果肉すなわち「コブラ」が続き、最後に「ココナツミルク」がある。コブラとミルクの両方はこの種子の内胚乳に相当する。ココナツは豊富な液体の内胚乳を持つ特異な植物であり、若い胚は内胚乳中にある。始めは、ミルクはかなり甘くコブラは薄いですが、種子が熟するにつれて、液体は油分が豊かな固体の内胚乳（中性脂肪）に変化する。内胚乳が固体となったコブラから収穫乾燥後、圧搾して抽出された油分は、シャンプーやアコンディショナの主成分として広く使用されている。

(g) ココナツの製品形態

ココナツは、用途が多いことから生命の木と呼ばれている。主なココナツ製品として、ココナツ油、乾燥ココナツ、新鮮ココナツ、およびコブラ（乾燥された熟したココナツ果肉）がある。フィリピンにおける主要なココナツ製品は、コブラ、コブラケーキ、ココナツ油、乾燥ココナツ、新鮮で熟していないココナツ、およびココナツ繊維である。このリストの内、乾燥ココナツ、新鮮で熟していないココナツ果肉である「ブコ」、およびココナツ油は外国市場で最も需要のある製品である。

2001年から2005年の間に、毎年国内で生産された推定1400万個のココナツの内、約90%がコブラへ加工される。年間のコブラ生産量は200万トンと推定される。ココナツの残り10%は、乾燥ココナツ(5%)と、ココナツミルクや「ブコ」や家庭用の他のココナツ製品の製造に使用される。生産されたコブラ総量の62%がCNO原油へと加工され、その内60%は輸出に向けられ、40%は国内で消費される。コブラ生産の副産物であるコブラケーキやコブラミールが34%を占める。

ココナツ製品の加工によって、洗剤、浴用石鹸、シャンプー、化粧品、マーガリン、調理油、菓子、食用酢、およびナタデココと言った他の製品が生産される。ココナツの中間生成物には、脂肪酸や脂肪族アルコールなどの含油化学物質がある。

最近、ココナツ油原油はココメチルエステルに変換されており、これはココバイオジーゼルと言う名前で、一般的には知られている。変換過程を通じて、コブラミールとグリセリンの2つの副産物が生成される。

(h) ココナツの副産物

ココナツの主要副産物は、ココナツ殻、ココナツ外皮、およびココナツ葉である。ココナツ殻は活性炭へ変換でき、一方ココナツ外皮からは、ココナツ殻木炭、ココナツ繊維、およびココナツ粉末を生産できる。

次に、3つの主要なココナツ副産物であるココナツ外皮、ココナツ殻、およびココナツ葉の組み合わせについて述べる。

国内で年間に産出される残余物の量は、特定の残余物毎の残余物対製品比(RPR)値と作物や製品の年間生産量との積に等しい。

Table 2.9.1. Residue-to-product ratios (RPR).

Agricultural Residues	RPR
Coconut shells	0.15
Coconut husks	0.33
Coconut fronds	0.33

次の表は、業界で使用される一般ココナツ残余物の発熱量を示している。

Table 2.9.2. Heating Values of coconut residues.

Type of Coconut residue	Heating Value, Kcal. kg
Coconut shell	4,436 (I. Cruz)
Coconut shell charcoal	6,540 (Lozada)
Coconut husk charcoal	6,320 (Lozada)

(i) ココナツ残余物の利用

ココナツ殻は、高い発熱量のためエネルギー用として、商業施設によってほとんど消費されている。ココナツ殻の主な利用者は、レストランまたは食品加工業のオーナーである。ココナツ殻は、コブラやゴムなどの作物の乾燥用にも使用されている。ココナツ殻の他のエネルギー用途としてセラミック産業および暖房用がある。

ほとんどのココナツ外皮は、「タパハン」と呼ばれる伝統的な方法によるコブラの乾燥に使用されている。ココナツ皮の残りは、製パン、魚の乾燥、窯業、陶芸、煉瓦製造、および商用食品調製で燃料として使用されている。

ココナツ葉はコブラ乾燥用に燃料として使用される一方、残りはレストラン、製パン、魚の乾燥などで使用される。

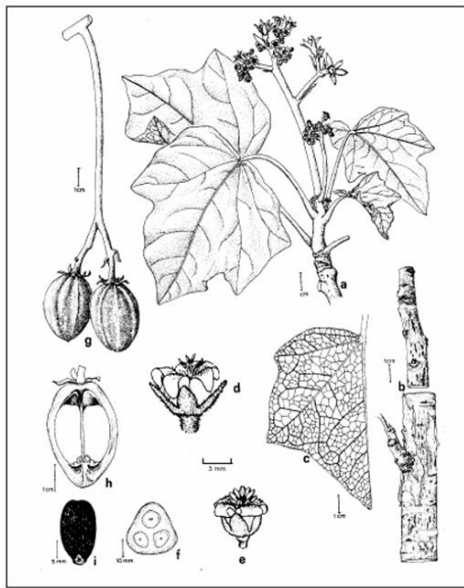


Fig. 2.9.1. Important parts of the *Jatropha Curcas*: a—flowering branch, b—bark, c—leaf veinature, d—pistillate flower, e—staminate flower, f—cross-cut of immature fruit, g—fruit, h—longitudinal cut of fruits; Source: *Physic nut*, Joachim Heller, IPGRI. p. 11.

2.9.7 ジャトロファ

属名 *Jatropha* は、ギリシャ語の *iatrós* (医者) および *trophé* (食品) に由来しており、医療用を暗示している。*Jatropha curcas* L.は Euphorbiaceae あるいはトウダイグサ科に属している。Curcas は下剤を意味している。各地の一般名: 英語 - **physic nut, purging nut** (下剤ナツツ); タイ - **sabudam**; インドネシア - **jarak pagar**; 中国 - **yu-lu-tzu**; フィリピン - **túbang-bàkod**; ブラジル - **mundubi-assu**; タンザニア - **makaen**。定義では、最大 6 m の高さになる多年生小樹木または大きな灌木である。中米原産のこの植物は主にアジアとアフリカで栽培され

ている。熱帯および亜熱帯で生垣として栽培される。しかし、種は人間および多くの動物に有毒であり、この種は高度の乾燥に耐性があるので食用作物と競合しない。保護なしに成長可能であり、田畑および農民の家屋を保護するための垣根として使用できる。この素晴らしい植物は 37%の油成分を持つ種を生産する。種を潰すと生成されるジャトロファ油は精製なしに高品質のバイオディーゼル燃料に加工でき（1 kg の種から 30~35%の油歩留りを生産可能）、標準ジーゼルエンジンに適用できる。副産物の油かすは良質の有機肥料であり、油は殺虫剤も含んでいる。バイオディーゼル生産におけるグリセリン副産物は、精製業者に貴重な追加収入をもたらしている。

他用途：

葉：蒸すか煮ることで若い葉は安全に食することができる。山羊肉と共に調理すると、臭いを消すのに有効であると言われている。

花：養蜂植物。

ナッツ：下剤の効能があるが、ときどき焼いて食される。草の上に吊るしてククイノキの実のように燃やすことができる。南スーダンでは避妊薬として使用される。

種：油は照明、石鹼、蠟燭、オリーブ油の混ぜもの、トルコ赤オイルの生産に使用される。トルコ赤オイルは硫酸キャスト油とも呼ばれており、水中で完全に分散する唯一の油である。硫酸を純粋なジャトロファ油に加えることにより作製される。浴用油製品の生産に簡単に使用できるので、通常の石鹼に続く最初の合成洗剤であった。潤滑剤、軟化剤、および染色補助剤の製造に使用される。種は、いったん蒸して焼くと食品として、特定の地域の人々から非常に高く評価されている。メキシコおよび中米で無毒品種のジャトロファが存在するのか、あるいは調理によって種が食用可能になるのかははっきりしない。いったん胚芽を除去するとジャトロファの種は食用可能になるということも、同様に報告されているが、これらの種が地域の無毒品種であるためである可能性もある。



Fig. 2.9.2. Flower of Jatropha.

根：灰は塩の代用として使用される。軟体動物の駆除に使用でき、殺人剤、殺魚剤、殺鼠剤としても挙げられている。

樹皮：魚毒として使用される。

乳液：スイカモザイクウィルスを強力に抑える。

樹液：亜麻布を染色する。ときどき模様で使用される。

灌木：メキシコ人は灌木をラックカイガラムシの宿主として栽培しており、この虫は肝臓保護および抗肥満の薬

品に使用されている。土壌浸食防止に使用されている。

参考文献

Banzon, J. A.; Velasco, J. R. Coconut: production and utilization. (1982)

2.10 水生植物バイオマス

2.10.1 水生植物バイオマスとは

水生植物バイオマスは、陸水や海洋で生産され、人が利用対象と考えるものである。利用されている水生植物バイオマスの大部分が種子植物・海藻・微細藻類で、ほとんど天然産でごく一部が人工養殖である。

陸水の種子植物バイオマスは water plant の *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms とウキクサである。ブラジル原産の *E. crassipes* は 18~32°C で活発に増え、34°C 以上や 0°C 以下では成長しない。約 30 種が知られているウキクサのバイオマス利用の適当種は未だ選定されていない。

世界中でトチカガミ科・アマモ科・ベニアマモ科の 3 科 13 属 60 種が知られている海産種子植物（海草）の中で、バイオマス利用が注目されるのは中・高緯度に広く分布するアマモ (*Zostera marina* L.) とその近縁種 (Hartog, 1970) である。

藻類には、多細胞の大型藻類（海藻）と、単細胞の微細藻類（植物プランクトン）がある。海藻はほとんどが海産で、バイオマス利用の進んでいるのは、紅藻 220 種、褐藻 88 種、緑藻 27 種 (Indergaard, 1982) である。

微細藻類は淡水・海水の両方に広く分布するが、出現種は異なる。バイオマス利用で現在注目されるのは、淡水産の緑藻 *Chlorella*、*Scenedesmus*、*Dunaliella* と藍藻 *Spiriluna* などである。特定種を人工培養して利用し、淡水株を順化して海水で培養することも行われている。

2.10.2 生産速度

E. crassipes の生産速度は、日本で生育期間内に 11~23 kg 生重/m²・年 (0.5~1.2 kg 乾重/m²・年)、光と栄養が充分な条件では 21.2 kg 乾重/m²・年に達する。アマモの生産速度は 0.3~0.8 kg 乾重/m²・年 (120~320 gC/m²・年) で、*Thalassia* のそれは米国のフロリダで年間 8 ヶ月間にわた

り 5 g 乾重/m²・日の生産速度が記録された。

紅藻の *Hypnea* の生産速度は屋外水槽培養で 12~17 g 乾重/m²・日が報告されている (Slessor and Lewis, 1973)。微細藻類の生産速度は屋外培養で 2~10 g 乾重/m²・日程度だが、好条件では 500 g 乾重/m²・日に達する。

2.10.3 実用例と現在の使用量

E. crassipes は全必須アミノ酸を含んでいて、ブタやニワトリなどの家畜飼料として好結果が出ているが、重金属類の吸着など検討課題がある。エネルギー利用では、*E. crassipes* の嫌気醗酵で 60~80% のメタンを含んだバイオガス 373 m³/トンが得られ、その燃焼熱量は約 5,300 kcal/m³ であった。また、*E. crassipes* は乾重量の 3.2% の窒素、0.7% のリン、2.8% のカリウムを含んでいて、肥料や土壌改良剤としての利用も検討されている。

アマモは、水族館で飼育されているジュゴンやマナティーの餌の一部に利用されている程度であり、人工栽培技術は確立されていない。

海藻バイオマスは既に関世界中で広く利用されている (Table 2.10.1)。世界の有用海藻の年間収穫量は褐藻約 130 万トン、紅藻約 81 万トンで、ほとんどが天然産だが、最近では人工養殖が増えてきた。海藻の利用用途は乾燥飼料、食料、肥料、土壌改良剤などである。海藻に含まれる独特な多糖類やヨードなどの有用物質は、有用物質を抽出する原材料としても利用されている (Indergaard, 1982)。コンブは乾燥重量の 13-45% のアルギン酸を含んでいて、食料、医薬品、化粧品、染色剤、塗料、製紙、室内装飾材料、潤滑油などの生産に利用される。紅藻の中には寒天や寒天によく似たカラゲナンを含む。

微細藻類は乾燥重量の 50-70% の高い割合でタンパク質を含んでいる。微細藻類は、健康維持のためのサプリメント、カロチノイドやフィコビリルンなどの色素成分やビタミン類を抽出する原材料、養殖水産生物の餌として事業利用が進んでいる。微細な大きさと自然界での濃度の低さから、微細藻類は周年培養の可能な中・低緯度で陸上のタンク、プール、水路などで人工培養されている。栄養塩類を高濃度に含む海洋深層水を陸上揚水して微細藻類を培養し、海産貝を養殖する事業モデルが提案されている (Roel ら, 1979)。

Table 2.10.1. Yearly yield of seaweed production and potential productivity in the world.
(x10³ tons FW, Michanek 1975 (referred from Indergaard 1982))

Area	Red algae		Brown algae	
	1971-73		1971-73	
	Yearly yield	Potential productivity	Yearly yield	Potential productivity
18 Arctic sea	-	-	-	-
21 NW Atlantic	35	100	6	500
27 NE Atlantic	72	150	208	2,000
31 W central Atlantic	-	(10)	1	1,000
34 E central Atlantic	10	50	1	150
37 Meditteranean, Black Sea	50	1,000	1	50
41 SW Atlantic	23	100	75	2,000
47 SE Atlantic	7	100	13	100
51 W Indian	4	120	5	150
57 E Indian	3	100	10	500
61 NW Pacific	545	650	825	1,500
67 NE Pacific	-	10	-	1,500
71 W central Pacific	20	50	1	50
77 E central Pacific	7	50	153	3,500
81 SW Pacific	1	20	1	100
87 SE Pacific	30	100	1	1,500
Total	807	2,610	1,301	14,600

Regional numbers represent the FAO classification of world oceanic regions.

2.10.4 バイオマス資源量

E. crassipes やウキクサの世界の資源量は不明である。*E. crassipes* は水域の富栄養化で低緯度域を中心に各地で大繁殖し、特にアフリカでは大河をせき止め有効利用が急がれる。

天然アマモ場のバイオマス量は 0.1~0.5 kg 乾重/m²だが、密生地では 2 kg 乾重/m²に達する。アマモ場は世界中で埋め立てや水質汚染による環境変化や消滅で減少していて、人工的なアマモ場の維持・造成が実験的に取り組まれている。平均密度を 0.3 kg 乾重/m²、含水量を 90%と仮定すると、全世界のアマモのバイオマス量は数千万トン生重以上と推定される。

天然産の海藻資源量をもとにした Jensen (1978, Indergaard, 1982 から) の推定によれば、アルギン酸の需要は年間 5 万トンで、必要海藻量は 130 万生重トン。カラゲナン、寒天、ノリ、ワカメ、コンブの需要はそれぞれ 3 万、2 万、3.5 万、3 万、25 万トンで、必要海藻量は、40 万、50 万、40 万、20 万、200 万生重トンに達する。これらは 1970 年代後半の生産量の 1.1~3 倍であり、この他に seaweed meal・化学工業・エネルギー用と高純粋化学用にそれぞれ年間に数百万と数千生重トンの海藻需要が見込まれる。こうした海藻需要に応えるには、将来、沿岸域はもとより外洋での海藻の大量生産が必要である。

参考文献

- Hartog, C. den. Seagrasses of the world. North Holland, Amsterdam. pp.275 (1970)
- Indergaard, M. The aquatic resource. In Biomass utilization (ed. W. A. Cote) Plenum Press, New York, pp.137-168 (1982)
- Mann, K. H. Ecology of coastal waters: a systems approach. Univ. Calif. Press, pp.322. (1982)
- Roel, O. A.; Laurence, S.; Farmer, M. W.; Hemelryck, L. Van. The utilization of cold, nutrient-rich deep ocean water for energy and mariculture. Ocean Mangement, 5,199-210 (1979).
- Slessor, M.; C. Lewis. Biological energy resources. E. & F. N. Spon Ltd., London (1979)

2.11 農産残渣

農産残渣とは、収穫時などに田畑等で発生する残余物のことを指す。農産残渣をエネルギー資源として考える場合、利用可能な残渣として穀物残余や根茎作物残余、サトウキビ残余などが挙げら

れる。野菜類の残余物も非常に多種・大量に発生するが、量的にまとまった資源として得ることが困難なため、エネルギー資源として計上されることは少ない。

2.11.1 農産残渣の種類と特徴

(a) 米・麦

米・麦の残渣は主として籾殻や藁が挙げられる。籾殻は一般に稲由来のものを指す。これは、麦の籾は収穫時に脱落したり、籾摺りすることなく加工等に用いられるためである。籾は形状、大きさがほぼ均一であり、加工、運搬に適している。しかしながらリグニン、シリカ(SiO₂)を多く含み、その構造は非常に堅固であるため発酵にはあまり適さず、多くが燃焼用の燃料として利用されている。しかし、10~20 wt%含まれているシリカが燃焼時に焼却炉を傷めることがあり、実際の利用の際に注意が必要である。藁もまた、籾同様リグニン、シリカなどが含まれているが、籾よりは発酵しやすく、燃焼、発酵の両者のエネルギー源として使用されている。

(b) トウモロコシおよび根茎作物

トウモロコシ残渣は、畑地での残余分(葉、茎など)の他、加工工程で芯が残余として排出される。トウモロコシの実の部分はでんぷんが多く含まれているため、米国では実の部分の発酵によりエタノールを生産している。また、根茎作物の場合は葉や茎が残余分となる。

(c) サトウキビ

サトウキビは製糖工場に搬送される前に、鞘頭部(糖度の低い頂上部分)、葉、根といった茎以外の部分は全て取り除かれるため、これらが畑地での残余分となる。

2.11.2 発生量

農産残渣の発生の仕方や量は生産地により異なるが、収穫量に対する残渣発生率として、米：140%、麦：130%、トウモロコシ：100%、根茎作物：40%という報告例がある[Hall et al., 1993]。また同例で、サトウキビ収穫時に畑地に残る鞘頭部や葉等は、収穫量に対して28%とされている。

FAOの統計より各種農作物の生産量(2000年)を求め、上述の残渣発生率を用いて推算した残渣の年間発生量をFig. 2.11.1に示す。世界全体では合計約3,000百万tが発生し、米残余が836百万tと最も多く発生する。また、根茎作物残余が272百万t、日本ではほとんど発生しない麦残余、トウモロコシ残余はそれぞれ754百万t、591百万tが発生する。

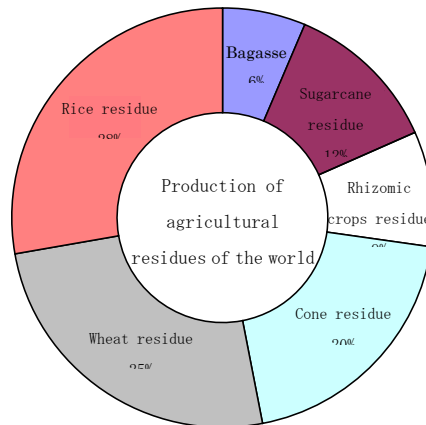


Fig. 2.11.1. Production of Cereal Residues and Bagasse.

2.11.3 世界のバイオマスエネルギーポテンシャル

Table 2.11.1 に 2000 年における世界の農産残渣のエネルギーポテンシャルを示す。これらの値は、先に述べた廃棄物発生量に対し、エネルギー換算係数、利用可能率など [Hall et al., 1993] を乗じて推算したものである。世界における資源量は、米残渣が最大で 3.4 EJ、ついで小麦残渣が 3.3 EJ となる。

Table 2.11.1. Bio-energy Potential from Agricultural Residues.

	Bio-energy potential (PJ/y)
Rice residue	3,407
Wheat residue	3,299
Corn residue	2,614
Rhizomic crops residue	407
Sugarcane residue	1,550
Total	11,277

参考文献

Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO Statistical Database, FAO Statistical Database, (<http://www.fao.org/>)

Hall, D. O.; Rosillo-Calle, F.; Williams, R. H.; Woods, J. “Biomass for Energy: Supply Prospects”, In: Renewable Energy, Johansson, T. B. eds., (1993) pp.594, Washington, Island Press.

2.12 木質系残廃材

2.12.1 環境的意義と特徴

生長量よりも伐採量が少ない持続的林業から得られる木材中の炭素は、森林・人間社会・大気の間を循環することから、大気中の二酸化炭素濃度を上昇させないカーボンニュートラルと呼ばれるものである。林業生産に要する化石燃料は、農水産業と比べて小さく、また製材・木造建築などの木材製品は、鋼製品などと比べて製造エネルギーは小さい。木材利用の拡大は二酸化炭素排出削減に貢献する。しかし木造建築など木材最終製品に貯蔵される炭素は、その元となった樹木バイオマス炭素の3割程度である。残廃材の材料リサイクルによる省資源とエネルギー利用による化石燃料削減はバランスをとって行うことが大事である。

木材・木質材料は密度が $0.2\text{--}1.0\text{ g/cm}^3$ と様々な物があり、低密度材では含水率状態により重量は3倍近く変動する。従って木材統計は体積で示されることが多い。日本で使われている木材の平均的密度は約 0.42 g/cm^3 と推計されている。炭素含量は0.5として良い。ただし接着剤を多用(重量比10%程度)する木質材料(パーティクルボード、MDF(中密度繊維板))では木材由来の炭素含量として0.45が使われることがある。

2.12.2 木材工業残廃材

製材・合板工場など木材工業から発生する残廃材は、種類も多く含水率も様々である。製材工場からの背板(丸太から板・角材を切り出した残部)や合板工場からの剥き心(丸太から単板を剥いた残りの円柱)など大きめの残材は、チップ化されてパルプ・ボード用として販売される。樹皮や鋸屑・プレーナ屑・単板屑などの小さめの残材は、畜産業が近くにある場合は家畜敷料、自社ボイラー燃料、堆肥などに利用されている。2005年の推計では見かけの材積で約1,200万 m^3 の残廃材が発生していると考えられるが、無駄に焼棄却されているのは7%程度である。

大規模工場では、残廃材エネルギー利用により、発電・乾燥用蒸気などとしてゼロエミッション生産も可能である。しかし乾燥設備を持たない小規模製材工場やプレカット工場からの残廃材は、

小口巡回収集システムなど利用システムの確立が求められる。また近年、樹皮・鋸屑などを原料とし、取り扱いやすくエネルギー密度も高い木質ペレットの生産も増えてきている。

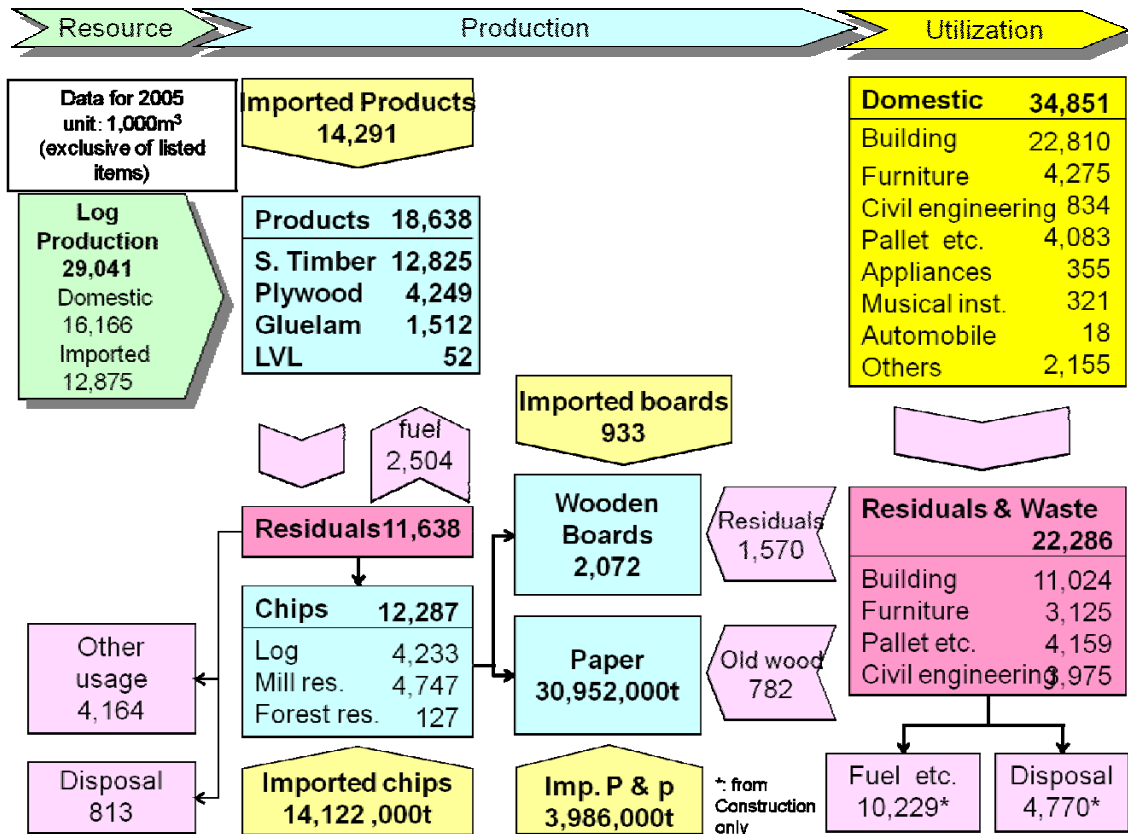


Fig. 2.12.1. Wood flow in Japan.

Table 2.12.1. Shipment of wooden primary products to utilization sectors (1,000m³) (2005).

	Building	Furniture & Fittings	Civil eng.	Pallets & Packaging	Home appliances	Musical instr.	Automobile	Other	Total	
Sawn timber	15,208	617	800	3,922				650	21,197	
Plywood	4,393	2,000	33	134	192	318		1,297	8,367	
Particle board	565	926			45	3		6	1,544	
Laminated timber	1,581	145						110	1,836	
LVL	390	114							504	
Fiber board	Hard board	23	6		27	0		18	4	78
	MDF	561	224			118			26	929
	Insulation b.	90	245						61	396
Total	22,810	4,275	834	4,083	355	321	18	2,155	34,851	

2.12.3 木材利用系残廃材

建築・家具・パレット梱包・土木部門からの残廃材発生量は、2005年で約2,200万m³と推計されている。なお土木残廃材には工事に伴う伐採樹木が含まれている。

材料リサイクル量は、パーティクルボードなどへ約160万m³、パルプ用へ約80万m³と10%程度である。建設発生木材(建築+土木)は建設リサイクル法により分別と再資源化が求められている。発生量約1,500万m³に対し、2005年の縮減を除く再資源化率は68.2%とされ、多くはエネルギー利用と考えられている。

京都議定書第一約束期間となり、また原油高などもあり、発電・鉄鋼・セメント・製紙工場など多くの産業で木質系残廃材のエネルギー利用が行われ始めている。木材利用系残廃材は処分費用がもらえるため、再資源化工場でも利益を得やすい。建設リサイクル法の目標値の達成は確実で、今後は木屑の不足が心配されるほどになりつつある。

省資源のための材料リサイクルを優先すべきではあるが、例えば接着剤・塗料などを含む物はパルプ用チップにはならず、ボード廃材も材料リサイクルはしにくい。また小部材・複合部材など材料リサイクルにコストがかかる物は、破碎して燃料チップにした方がよい。発生量の半分以上は無駄なくエネルギー利用すべき物と考えられる。それにより100万炭素トン以上の化石燃料消費を

削減できる。

2.12.4 エネルギー利用手法

土木伐採樹木を除く木材利用系残廃材の含水率は乾量基準で 15%程度と考えられ、破碎チップとして直接燃焼をする場合のエネルギー効率も比較的高い。またガス化による発電や気体・液体燃料製造も可能性がある。一方、製材残材など木材工業系残廃材は含水率 100%近い物があり、また形態も様々な物があるため、利用技術を検討する必要がある。鋸屑・樹皮など粉体化エネルギーが少なくすむ物は木質ペレットなどで良いだろう。

日本政府は 2020 年までに木質系エタノールを 200 万 kL 製造することを目標にしている。木材はリグニンがセルロース等を包み込む構造で、糖化・発酵とも前処理なしでは難しい。将来的には自動車のエネルギーについては液体燃料から電気に転換すべきとの意見もある。

参考文献

Ministry of Land, Infrastructure and Transport Japan: Investigation of construction byproducts 2005(2006) (in Japanese)

Mayu Takagi, Hachiro Takeda, Takeshi Okano: Trends in the carbon transferred from forests to the populated area of Japan –Estimates from timber supply and demand statistics-, Wood Industry, 62(8), 354-357(2007) (in Japanese)

Mario Tonosaki, Yuko Tsunetsugu, Masayuki Ozawa, Kenji Hanaoka: Wood utilization for Japanese forestry, Journal of the Japan Institute of Energy, 84, 973-979(2005) (in Japanese)

2.13 畜産廃棄物

2.13.1 畜産廃棄物とは

畜産廃棄物の主たるものは家畜ふん尿であり日本では国内有機性廃棄物の最大量を保有する。易分解性有機物含量の高い、窒素やりんなどの肥料成分の豊富な資材であり、家畜の種類、体重、給与飼料、飲水量、飼養形態、季節や家畜の体調によって、その質も量も大きく変動する。それぞれのふん尿の特性に応じた貯留・搬出および処理方法が適用され処理されている。その他の畜産廃棄物として畜産副産物などと畜場で発生する枝肉以外の産物がある。

2.13.2 畜産廃棄物の特徴

Table 2.13.1 に畜種や畜体重量別に排泄原単位を示す。標準的な家畜飼料の種類と摂取量から排泄されるふん尿量が、畜種や畜体重量別に排泄原単位として算定されている。牛ふんは炭素率（C/N比：炭素と窒素の含有割合）が高いが比較的難分解性有機物が多く、鶏ふんは窒素、りん酸やカリ等の肥料成分割合が高く、比較的分解しやすい有機物が多く含まれる資材と見られる。畜産副産物には内臓肉（タン、モツやレバーなど）が含まれ、“廃棄物”という範疇にはいるのは、畜産加工残渣と呼ばれる不可食残渣（不可食内蔵、骨、脂肪、血液、皮および羽毛）と考えられる。

Table 2.13.1. The amount of standard excretion for major livestock

Livestock type		Total weight (kg/head/d)			Nitrogen (gN/head/d)			Phosphorus (gP/head/d)		
		feces	urine	total	feces	urine	total	feces	urine	total
Dairy Cattle	lactating	45.5	13.4	58.9	152.8	152.7	305.5	42.9	1.3	44.2
	non-lactating	29.7	6.1	35.8	38.5	57.8	96.3	16.0	3.8	19.8
	heifers	17.9	6.7	24.6	85.3	73.3	158.6	14.7	1.4	16.1
Beef cattle	Breeding cows (under 2year old)	17.8	6.5	24.3	67.8	62.0	129.8	14.3	0.7	15.0
	Breeding cows (2year and older)	20.0	6.7	26.7	62.7	83.3	146.0	15.8	0.7	16.5
	Dairy breeds	18.0	7.2	25.2	64.7	76.4	141.1	13.5	0.7	14.2
Pig	Fattening pig	2.1	3.8	5.9	8.3	25.9	34.2	6.5	2.2	8.7
	Sow	3.3	7.0	10.3	11.0	40.0	51.0	9.9	5.7	15.6
Layer	Chick	0.059	-	0.059	1.54	-	1.54	0.21	-	0.21
	Adult	0.136	-	0.136	3.28	-	3.28	0.58	-	0.58
Broiler	Adult	0.130	-	0.130	2.62	-	2.62	0.29	-	0.29

2.13.3 畜産廃棄物の発生量

Table 2.13.1 の数値を元に、日本で年間に発生した家畜ふん尿の量はふんが 6073 万 t、尿が 2772 万 t で、合計 8844 万 t に達すると算定される (Table 2.13.2)。家畜ふん尿に含まれる窒素は 67 万 t、リンは 11 万 t と推定される。この量は、年間に消費される化学肥料の窒素が 48 万 t、リンが 25 万 t であることを考えると、極めて膨大な量である。畜産加工残渣については、全体量を把握するために各処理業者（レンダラー）から生産実績を収集・整理した統計が存在しない。各地域のと畜場と食鶏処理場で処分されると畜頭羽数から年間 150 万 t から 167 万 t の発生推定量が提示

されている。この量は畜産廃棄物総発生量の2%に満たない。

Table 2.13.2. The annual production of livestock waste in Japan

Type	Number (Thousand)	Livestock Waste (thousand tons)			Organic materials, N and P in Waste (thousand tons)		
		Feces	Urine	Total	Organic matter	Nitrogen	Phosphorus
Dairy Cattle	1,683	21,206	6,261	27,467	3,424.2	134.9	18.8
Beef Cattle	2,805	18,990	6,872	25,862	3,452.5	130.9	15.9
Pig	9,724	7,857	14,586	22,443	1,644.3	151.5	32.3
Layer	174,550	7,698		7,698	1,154.6	154.0	29.3
Broiler	104,950	4,975		4,975	746.2	99.5	11.4
Total		60,725	27,719	88,444	10,421.9	670.8	107.6

2.13.4 畜産廃棄物の実用例と現在の使用量

Fig. 2.13.1 は主な畜種の主要な処理システムについて羽賀（農研機構）がまとめたものである。畜産局畜産経営課（当時）の調査結果によれば、乳用牛、肉牛農家でのふん尿の固形分処理は、大部分が堆積、あるいは簡易な堆肥化処理に止まり、汚水も貯留して自己経営内で利用している事例が多い。養豚農家では強制発酵が固形分処理の主体であり、汚水は浄化や発酵処理を行い、経営外への持ち出しを指向していた。また、採卵鶏では乾燥処理、ブロイラーではそのまま経営外への販売・利用が多い。これらの状況は、一般的に乳牛や肉牛経営農家は自己保有の農地を持っているのに対し、養豚や養鶏農家が農地をほとんど所有していないことが原因と考えられる。畜産加工残渣に関する処理においては、レンダリングと呼ばれる一連の処理によって大部分が食用油脂、飼料や工業原料として利用されている。

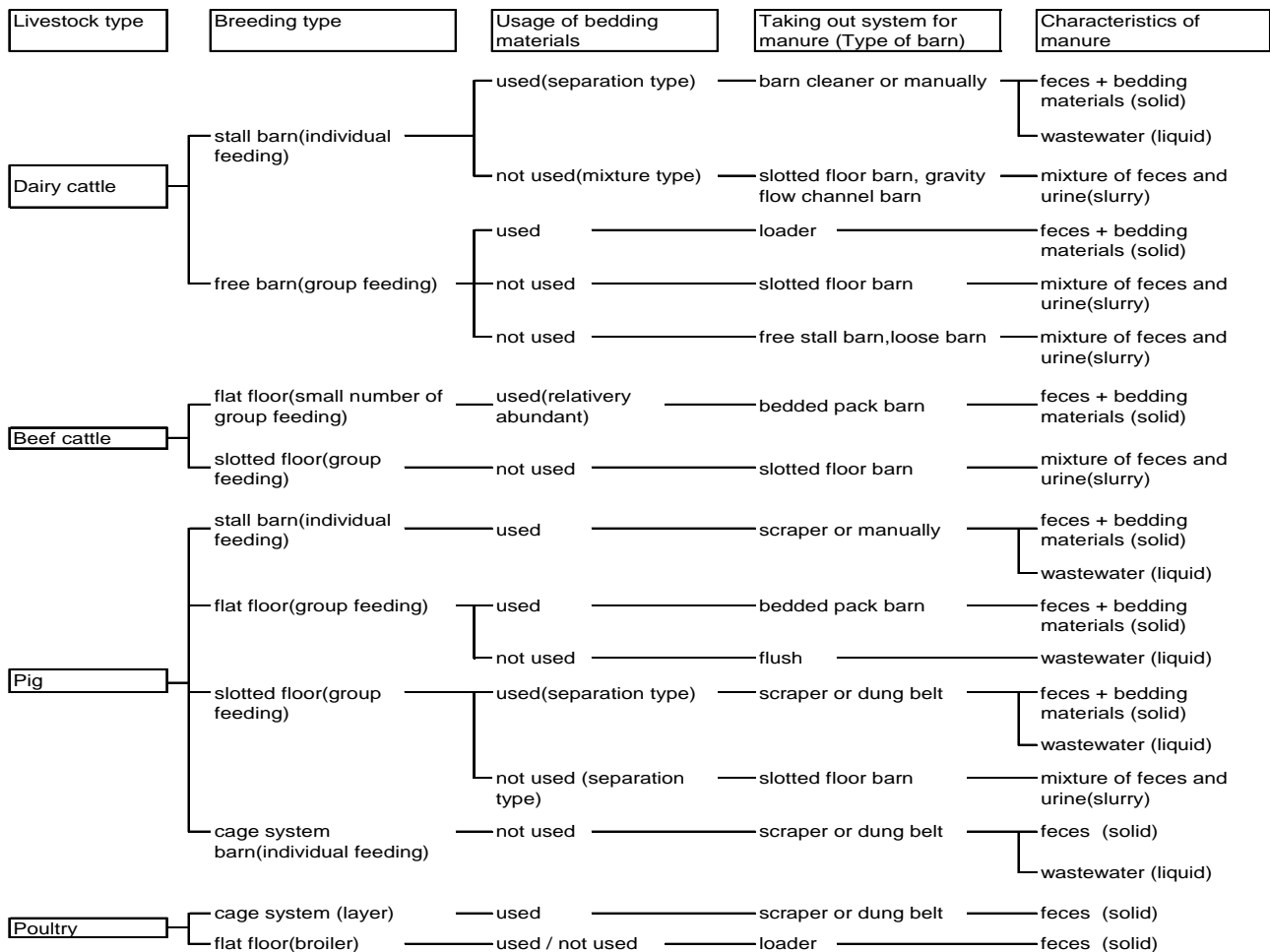


Fig. 2.13.1. Major breeding type and characteristics of manure of each livestock type.

2.13.5 日本と世界の資源量

家畜ふん尿の資源としての価値を算定するには、まず、1) 作物への栄養塩（窒素、リン等）としての価値、2) 作物生育へのプラス効果をもたらす有機物の供給源としての価値、3) エネルギー源としての価値などが考えられる。世界の全家畜のふん尿中に含有される窒素やリンについては、飼養形態の違い等から正確な算定は困難であるが、FAO の家畜頭羽数の統計値を基に、荒く換算すると、日本のふん尿中の窒素、リン量の約 140-150 倍程度と想定される。

2.14 下水汚泥

2.14.1 下水汚泥とは

下水汚泥とは、下水処理過程において生成し、処理系外に排出された泥状物質の総称であり、下水中に含まれる懸濁物質が沈殿したものや、処理中に生成した微生物が沈殿したものなどが主体となっている。下水汚泥は、有機分を多く含み、バイオマス資源としての有効利用も図られている。

2.14.2 下水汚泥の種類と特徴

代表的な下水処理法として、標準活性汚泥法の基本的プロセスを Fig. 2.14.1 に示す。

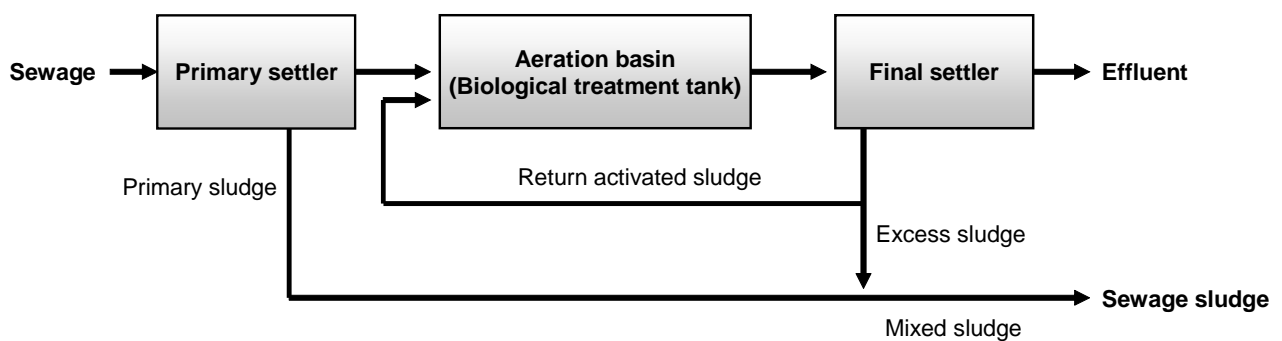


Fig. 2.14.1. Basic standard activated sludge process.

標準活性汚泥法の基本的プロセスでは、最初沈殿池において、沈降性の高い懸濁物質が沈降し、「生汚泥」として引き抜かれる。次に、通気攪拌を行った反応タンク（曝気槽）において、汚水中の有機物は、多様な微生物の集合体である活性汚泥と接触し、吸着または分解される。その後、最終沈殿池において、活性汚泥は重力沈降により処理水と分離され、「返送汚泥」または「余剰汚泥」として引き抜かれる。本プロセスにおいて、下水汚泥である「生汚泥」や「余剰汚泥」は、それぞれ単独もしくは混合されて処理系外に排出され、濃縮・脱水した後、焼却や溶融などの処理を行い、埋立処分もしくは有効利用されている。下水汚泥の代表的な処理プロセスを Fig. 2.14.2 に示す。

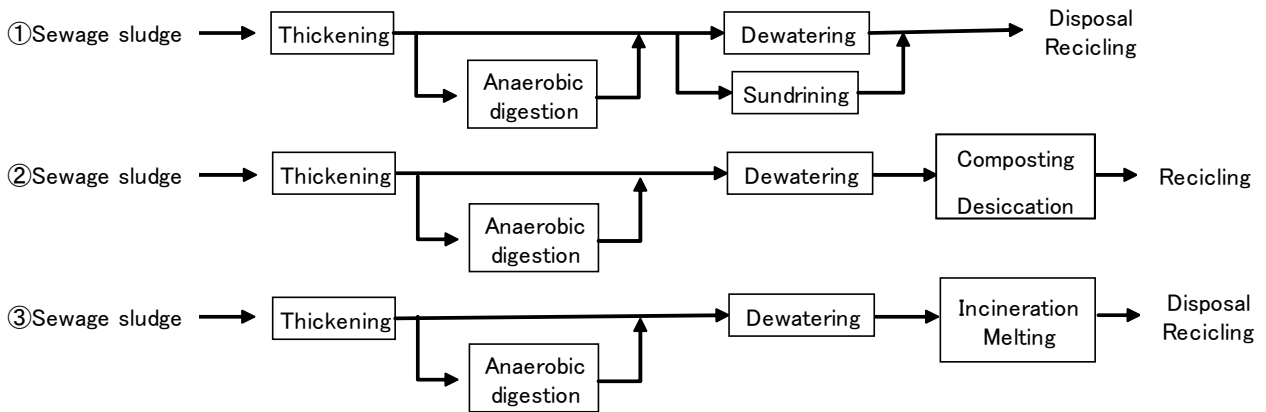


Fig. 2.14.2. Typical treatment process of the sewage sludge.

2.14.3 下水汚泥の有効利用

下水汚泥の有効利用例について、Fig. 2.14.3 に示す。

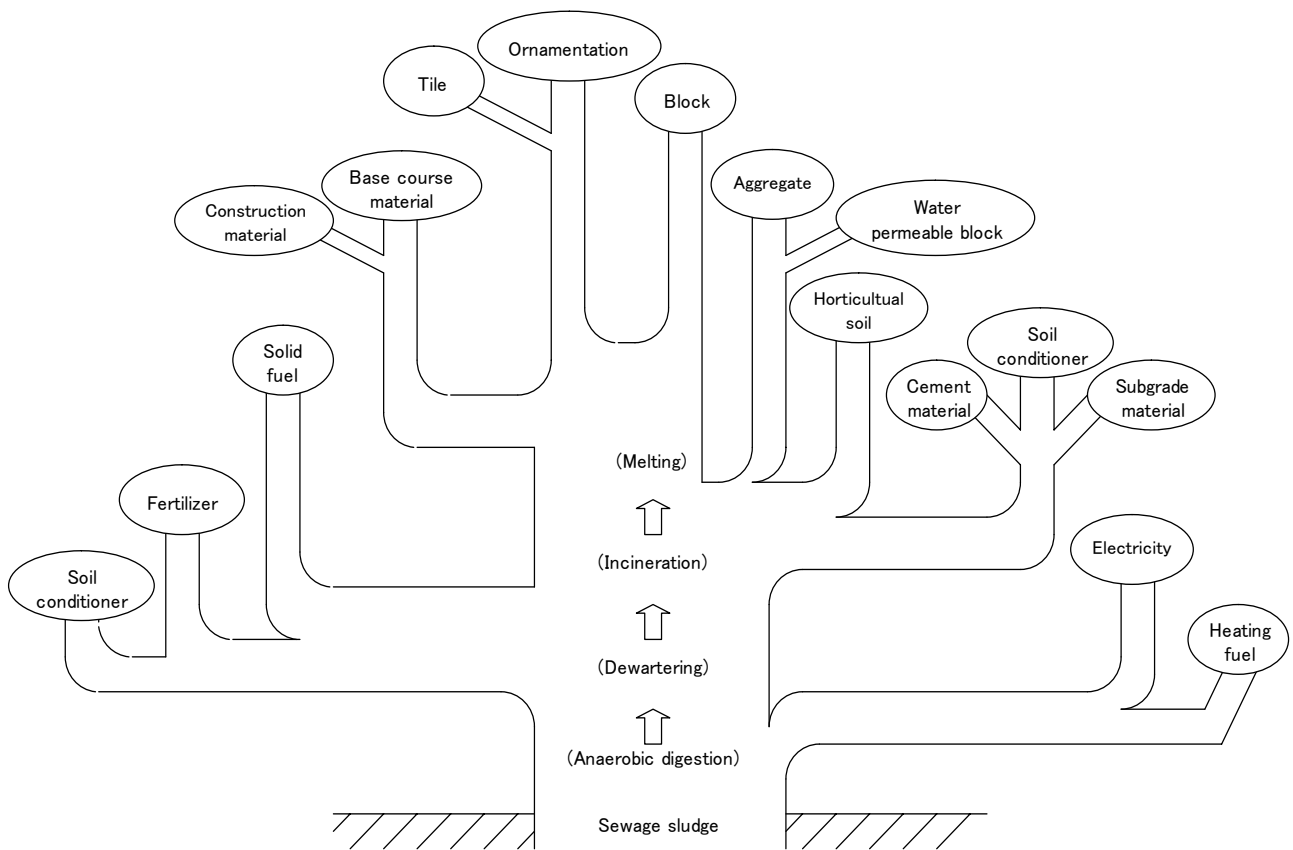


Fig. 2.14.3. Example of sewage sludge recycling.

下水汚泥は、Fig. 2.14.3の有効利用系統樹のように、消化・脱水・焼却・熔融を行うことにより、各段階で様々な再資源化が図られている。

消化段階では、下水汚泥を嫌気性消化槽に導入し、嫌気性微生物群の働きによって有機分が分解されるとともに、メタンを主成分とするバイオガスの回収が可能となる。回収されたメタンガスは、ガスエンジンやガスボイラーなどを用いて、電気・熱エネルギーに変換され、下水処理施設で利用されるエネルギーなどとして利用される。

脱水、焼却、熔融段階における有効利用分野は、肥料、土壌改良材といった緑農地向けと、骨材、路盤材、タイル、透水性ブロックといった建設資材向けに大別される。建設資材利用は今後の有望分野として需要開拓が進められている。

参考文献

Japan Sewage Works Association: Sewage Facilities planning, policy and explanation (second part) 2001, (2001) (in Japanese)

Japan Sewage Works Association: Japan Sewage Works 2005, pp.141, Aikosha (2005) (in Japanese)

The Japan Institute of Energy: Biomass Handbook, pp. 70-72, Ohmsha (2002) (in Japanese)

2.15 都市ごみ

都市ごみ中の主たるバイオマスは、生ごみと紙である。これらのうちどちらを対象とするかによって、以下のようなエネルギー回収方法がある。

2.15.1 埋立地からのメタンガス回収

有機物が埋め立てられた廃棄物埋立地の内部は必然的に嫌氣的雰囲気となるので、メタンガスが発生する。埋立地に隣接する建物の爆発や植物の生育阻害などの問題のため、ガス抜き、燃焼などの埋立ガスの制御は1960年代から始められた。その後エネルギー利用を目的としてガスの抽出が行われるようになり、欧米では広く行われている。最も一般的な方法は鉛直井戸によるもので、ガスをポンプ吸引する。回収されたガスは燃料として外部へ供給するか、埋立地での発電に利用される。都市ごみ乾燥重量1トンあたり120~150 m³の埋立ガス（メタン濃度は55±5%）が回収され、発熱量にすると約2500 MJ/tに相当する。埋立地の安定化を早めると同時にガス発生速度を高めて

効率的なエネルギー回収を目的として、埋立地内の水分、pHなどを制御するバイオリクター埋立地の研究も進められている。

日本では、浸出水集水管からの酸素供給によって好氣的ゾーンを広げようとする準好気性埋立構造が主流であること、紙や厨芥は焼却され、埋立物が焼却灰と不燃物が中心で有機物量が少ないため埋立ガス回収は行われない。東京都海面処分場が唯一の例で、1982年から埋立ガスを回収し発電を行っているが、年平均約 3000 MWh (850 世帯分の家庭消費量) に過ぎない。

2.15.2 バイオガス化

生ごみを分別収集し、嫌気性分解によってメタンガスを取り出す技術をバイオガス化と呼んでいる。2.15.1もメタンガスを取り出すが、有機物の分解を埋立地内で行うか、埋立前に装置で行うかの違いである。欧米では1980年代から研究が始められ、1997年の時点で世界に90施設(総処理量350万トン/年)が稼働しているとの調査結果がある。日本では生ごみを受け入れる施設は12施設、うち生ごみのみは3施設に過ぎない。基本的な処理フローはFig. 2.15.1のようであり、メタンガス回収後の固形残渣は最終的に堆肥化される。メタン発酵槽は固形物濃度によって湿式(6~10%)、乾式(25~40%)に分けられ、混合方式(完全混合/押出し)、操作温度(高温/中温)によっても分類される。

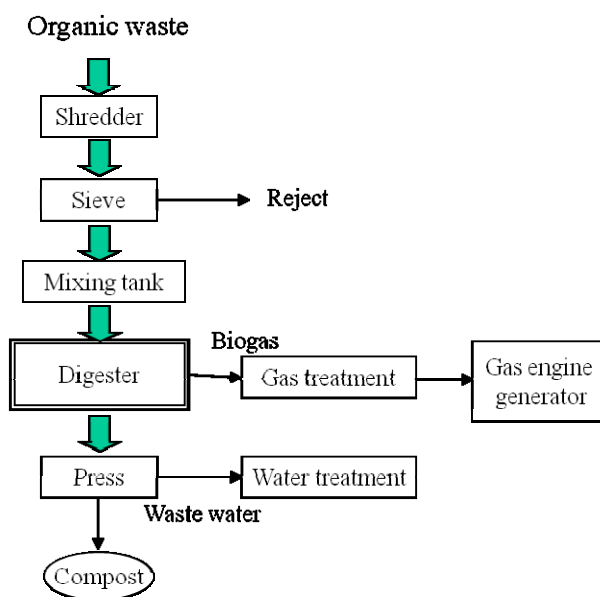


Fig. 2.15.1. Process flow of Biogasification.

2.15.3 ごみ発電

わが国では一般廃棄物の約80%が焼却されている。組成にもよるが、ごみの発熱量は石炭の3分の1程度である。ごみの燃焼温度は850~1000℃であり、高温の燃焼排ガスは集じん装置の使用温度まで冷却する必要があるため、この際にエネルギーが回収できる。エネルギーを温水、蒸気として回収し、施設内の暖房、給湯などに利用することは中小規模の焼却炉でも行われ、大規模焼却

炉では温水プール、厚生施設など、施設外への供給が可能となり、発電を行うこともできる。2005年現在、3分の2の施設で温水利用し、5分の1の施設で発電を行っている。

しかし石炭火力発電の発電効率が40%を超えるのに対し、ごみ発電の効率は平均して10%程度にすぎない。これは、320℃以上で腐食性ガスによる腐食が起こるため、蒸気を高温にできないこと、製造された電力の売電価格が低く、高温高压化する技術の利用、高価な発電設備を持つことのメリットが小さいことなどが理由である。また600トン/日の施設の場合、集合住宅1000～1500世帯の集中暖房ができるが、日本の焼却施設は住宅地から離れたところにあるため、有効な利用ができない。温水プール、動植物用温室は集中暖房と較べると、それぞれ50世帯、15世帯分の熱量で足りてしまう。積極的なエネルギー利用のためには、都市計画自体を考える必要がある。

2.15.4 RDF発電

RDFはRefuse Derived Fuelの略であり、ごみから製造した燃料の意味である。ガス化、油化も広義のRDFだが、一般にはごみを破碎し、不燃分を除いたものをさす。日本におけるRDF製造はまずプラスチック、紙など、単一の事業系ごみを対象に始まり、家庭系ごみを対象とした施設建設は1980年代後半になってからである。不燃物の除去、乾燥、破碎を経て成形されるRDFはごみと較べて貯留性、輸送性に優れ、焼却に代わるごみエネルギーの有効利用方法として中小都市において採用された。1993年には国庫補助対象となって施設が増加した。RDF燃焼炉でのダイオキシン発生が課題として挙げられたが、一箇所に集めて大規模発電を行う「広域処理によるRDF発電」が計画され、単独での焼却炉建設が困難な中小都市の有力なごみ処理の選択肢となった。

RDFはごみと較べて低位発熱量が高く、性状が安定しているため高温蒸気を得やすく、発電効率を高くすることができる。2001年より県を事業主体とした5箇所でRDF発電が始まり、160～310t/日規模、発電効率20～30%、発電出力3000kW～20000kWで稼働している。しかし2003年に三重県のRDF貯蔵サイロで爆発事故が起こった。その後、他の施設でも類似の事故があり、またRDFが有効に利用されない例も多いことが明らかとなった。全国の43箇所（2003年）で稼働あるいは建設中であったが、こうした問題のために、RDF発電には疑問符が付けられている。なお、米国では148の焼却プラントのうち121施設で発電を行っており、うち15施設がRDF焼却炉で平均1370トン/dの処理能力を持っている。しかし米国でいうRDFは破碎、不燃物除去により性状を均一化するだけのものでフラフRDFと呼ばれており、日本の固形化RDFとは異なっている。

2.15.5 熱分解による炭化・ガス化

1990年代後半にダイオキシンが問題となってから、500℃前後の比較的低温でごみを部分燃焼あるいはガス化し、発生した可燃ガスおよび熱分解残渣を燃焼させて固形分を溶融・スラグ化するガス化溶融施設の建設が急速に進んだ。2005年時点で、全国に77箇所の施設がある。1200～1500℃で溶融するためダイオキシンが分解され、発電効率が高く、スラグがリサイクルできることが長所とされた。しかし助燃料、電気使用量が多く、スラグのリサイクル率が低いなどの問題が明らかとなってきた。そのため、前段部分のみを独立させた炭化技術が注目されている。不燃物の除去と、水洗によるチャーの脱塩が木材などの炭化プロセスと異なる点であり、得られた炭化物は炭の代替、土壌改良材としての利用のほか、高炉への微粉炭代替燃料として使用することが期待されている。炭化は熱分解によってチャーを燃料として取り出す技術だが、欧州では熱分解はガス化を目的に行われている。

参考文献

- R.Stegmann, “Landfill gas utilization: An overview” in Landfilling of waste: Biogas (ed.T.H.Christensen, R.Cossu, R.Stegmann), E&FN SPON (1996)
- Tadashi Abe, “Beikoku ni-okeru Gomi-hatsuden no Hatten”, Waste Management Research7(4)、305-315(1996) (in Japanese)
- Hideaki Fujiyoshi, “Toshi-gomi no Tanka-nenryo-ka Shisetsu”, ENERGY, 57-59 (2001-4) (in Japanese)
- Shigeo Shikura, Hideki Harada, “Toshi-haikibutsu no Kenkisei-shoka”, Waste Management Research 10(3)、241-250(1999) (in Japanese)
- Website of Tokyo-to, <http://www2.kankyo.metro.tokyo.jp/tyubou/> (in Japanese)
- Toru Furuichi, Norio Nishi (ed), “Biocycle”, Kankyo-Shinbunsha (2006) (in Japanese)
- Tsukasa Kagiya, “RDF Hokanji no Hatsunetsu to Kongo-no Taio”, Kankyo-Shisetsu 94, 48-55 (2003) (in Japanese)
- “RDF Hatsuden-shisetsu o Kaku to-suru Gomi-shori Koiki-ka ni Kadai”, Kankyo-Shisetsu 94, 42-47 (2003) (in Japanese)
- Hideaki Fujiyoshi, “Gasu-ka Yoyu-ro no Unten Kanri to Kaizen Jirei”, Kankyo-Gijutsu-Kaishi 129, 86-99 (2007) (in Japanese)

2.16 黒液

2.16.1 黒液とは

木材などから、紙の原料である化学パルプを製造するときに、黒液という有機性廃液が発生する。黒液はパルプ工場に設置された専用の回収ボイラーで燃料として使用される。広葉樹の場合、パルプ製造 1 トンあたり固形分重量で約 1.5 トンの黒液が発生する。黒液の発熱量は一般的に乾燥固形分重量 1 kg あたり 12.6 MJ である。得られたエネルギーは主にパルプや紙の製造プロセスで使用されている。

2.16.2 黒液発生のプロセス

紙の原料となるパルプにはいろいろな種類があるが、大きく分けると、木材を薬品で処理して繊維を取り出す化学パルプと、物理的に磨砕して繊維を取り出す機械パルプの二種類に分けられる。黒液はこの化学パルプの製造工程で発生する。この化学パルプにはクラフトパルプとサルファイトパルプがあるが、現在はクラフト法によるパルプ製造が化学パルプの主流となっているので、本稿ではクラフトパルプの製造プロセスに基づいて説明する (Fig. 2.16.1)。

紙の原料となる木材は、木材繊維を構成するセルロースとヘミセルロース、そして、繊維同士を固める接着剤としての役割を果たすリグニンから成り立っている。これらの構成比率はおよそ 55 : 20 : 25 である。

このリグニンを分解・可溶化して木材繊維を取り出す工程を蒸解工程と呼ぶ。クラフト法では薬品として Na_2S と NaOH を用い、140~170°C で数時間加熱し、リグニンを分解・可溶化して木材繊維 (パルプ) を取り出す。このときに、繊維を構成するセルロースとヘミセルロースにできるだけダメージを与えないようにすることが重要であるが、実際にはセルロースの一部とヘミセルロースの大部分は分解・可溶化してしまう。概括的に言えば、木材中の有機物の約半分がパルプになり、約半分が黒液になる。

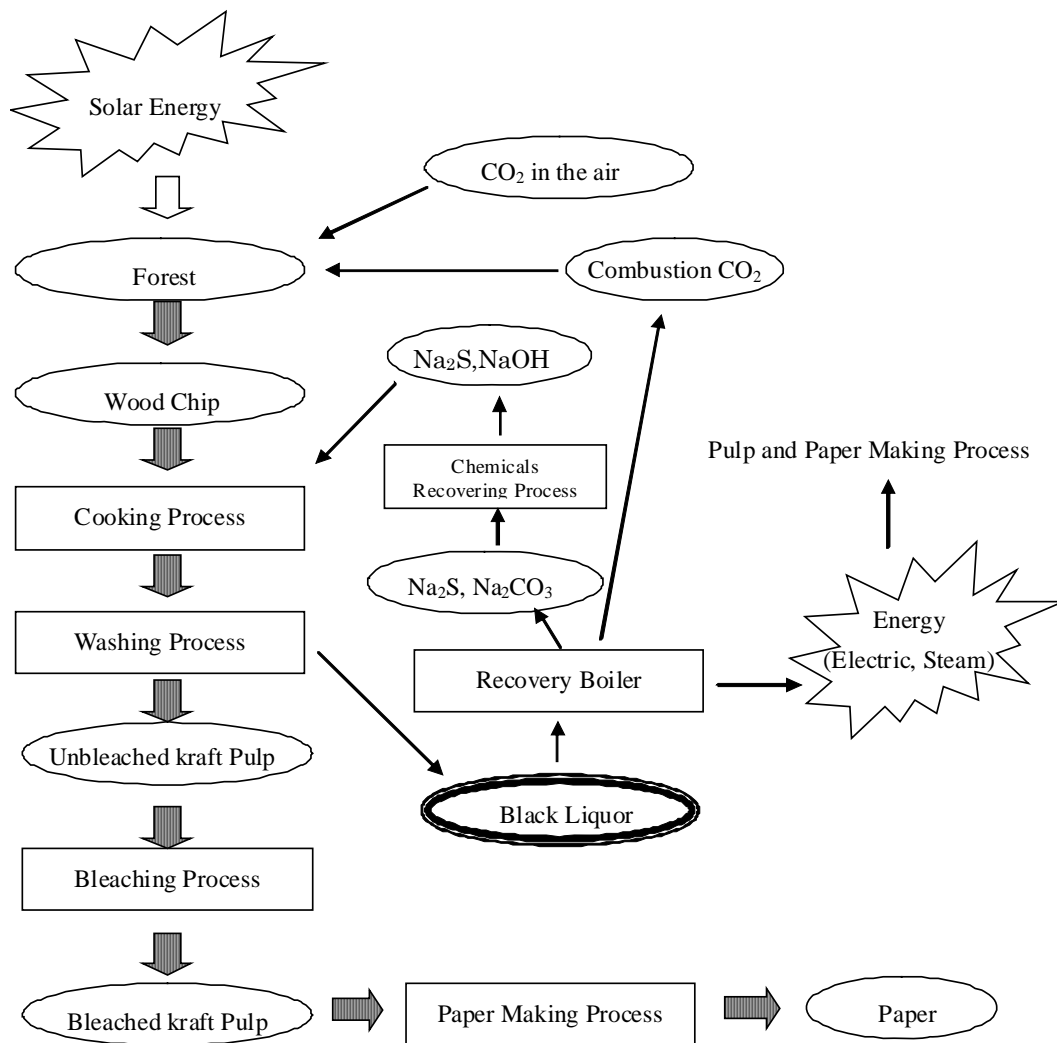


Fig. 2.16.1. The main stream for pulping.

黒液は分解・可溶化されたリグニンとヘミセルロースを含み、Na と S を含んでいる。発生時の濃度は通常 15～20%である。この黒液は真空蒸発缶によって 70～75%程度まで濃縮された後、回収ボイラーという専用のボイラーで燃焼される。広葉樹の場合、パルプ製造 1 トンあたり固形分重量で約 1.5 トンの黒液が発生する。黒液の発熱量は一般的に乾燥固形分重量 1 kg あたり 12.6 MJ である。

回収ボイラーで燃焼された黒液中の Na と S は熔融状態で取り出され、温水で溶解したあとにソーダ回収工程で Na_2S と NaOH に再生され、蒸解工程で使用される。一方、分離された木材繊維は洗浄工程や漂白工程を経てパルプとなり、紙の原料として使用される。

2.16.3 黒液の特徴と意義

このように、黒液を回収ボイラーで燃焼させるということは、エネルギーを得ると同時に、パルプ製造に必要な薬品を再生するためのプロセスのひとつでもある。つまり、クラフトパルプ製造プラントでは黒液の燃料としての利用が必要不可欠であり、すべてのクラフトパルプ製造工場では黒液の燃焼利用が行われている。

広葉樹の場合パルプ1トン当たり固形分重量で1.5トン、針葉樹の場合2.0トンの黒液が副生物として発生する。そして、その全量が基本的にバイオマスエネルギーとして利用される。日本におけるクラフトパルプ生産量は年間約9百万トンであり、黒液発生量は約1千4百万トン（固形分重量）である。これを原油に換算すると471万キロリットルに相当する。

世界全体では1999年における化学パルプ生産量が、1億1千9百万トンであり、約2億トン（固形分重量）の黒液が発生していると推定され、原油換算ではおよそ6千万キロリットルに相当する。（Table 2.16.1）。

近年、日本およびアジア諸国では、パルプ原料の木材は主に植林木が用いられるようになってきた。従って、素材とエネルギーの双方を、持続可能な森林経営を基本とするパルプ用木材資源から生み出すことによって、紙パルプ産業を持続的に発展できる産業にすることができる。黒液の利用はまさにその根幹をなすものである。

現在、黒液の利用は紙パルプ工場内のエネルギー利用に限られているが、サルファイト法のパルプ工場では、黒液からリグニンを分離してのリグノスルホン酸の生産や、リグニン分離後の黒液中に含まれる糖分を利用して、酵母の培養による核酸の生産など、多彩な物質生産も行われている。今後黒液利用のバイオリファイナリーが展開してゆく可能性が期待される。

Table 2.16.1. The pulp production.
(1000 tones)

	1989	1994	1999
World	113,803	111,304	119,260
Europe	19,381	20,219	22,502
North America	58,053	62,714	61,934
Asia	17,490	13,755	17,252
Latin America	5,517	7,527	9,652

参考文献

- Keiichi Tsuchiya, Makoto Iwasaki, Tadanori Oihata, Yoshihiro Sakaguchi, Keiichi Tsuchiya, “Pulp and Paper Manufacturing Technology Complete Book, Vol. 2 Kraft Pulp”, 11-20, 185-223 (1996) JAPAN TAPPI (in Japanese)
- JAICAF Edition, “World Forest White Paper 1997”, JAICAF (in Japanese)
- JAPAN TAPPI Energy Committee, “Survey on Energy Consumption in the Pulp and Paper Mills in Japan Part 1”, 55, 573-591 (2001) JAPAN TAPPI (in Japanese)
- JAPAN TAPPI Edition “Pulp and Paper technical handbook”, 105-136 (1971) JAPAN TAPPI (in Japanese)
- Yuuichi Hayase, “Seishi-koujou kara-no Fukuseigenryou ”, 50, 1253-1259, Thermal and Nuclear Power Engineering Society (in Japanese)
- Masahiro Kitazume, “Sekai no Kami Parupu”, 8-15, September (2000) Kami-Parupu (in Japanese)
- Keiichi Nakamata, “Kami to Shinrin no Kakawari”, Global Environmental Policy in Japan the 1st report, 1-9 (1999) Chuo University Press (in Japanese)

2.17 食品加工廃棄物

2.17.1 食品加工廃棄物の潜在性

本章では、タイの例を紹介しながら食品加工廃棄物について示す。農業国であるタイ国にとって食品産業部門は、タイ国経済において重要な役割を果たしており、輸出額の大きな部分を毎年占める。食品とそれに関連する製品の加工は、熱、機械、化学処理を伴うため、食品加工廃棄物の適切な処理には環境面の配慮という問題が提起されるのは否めない。食品加工廃棄物は、その物理的形狀から、主として固形廃棄物と液体廃棄物の2種類に大きく分類される。固形廃棄物は、アブラヤシの果実殻、バガス、稲作の残さ（わら、切り株、籾殻）、キャッサバデンプン工場廃棄物やトウモロコシの穂軸まで多種多様である。一方、液体廃棄物は、主として水や他の溶剤を使用した洗浄、清掃、抽出などの食品加工で生じる。

従来、固形廃棄物は、工場の加工処理自体に使用される蒸気の生成あるいは発電のために、ボイラーに投入されてきた。ガス化などのバイオマス技術を利用すると固体廃棄物は、単なる制御されていない燃焼に比べて、効率よくエネルギーに変換できる。一方、液体廃棄物は環境面で規制されるため、加工工場は排水処理システムの設置を義務付けられる。このようなシステムは嫌気性消化

処理技術を利用していることが多く、工場のエネルギー源として利用できるバイオガスも生成される。

2000年のエネルギー省による評価では、バイオガスを生産する潜在能力の高い上位9つの工場は、キャッサバ、製糖、アブラヤシ、魚介類の缶詰、冷凍食品、食肉処理、パイナップルの缶詰、炭酸ソーダ類およびアルコール飲料工場である。バイオガス生産の可能性を評価するために、タイ国研究基金（TRF, <http://www.trf.or.th>) は、キャッサバ、サトウキビ、アブラヤシ、パイナップルの缶詰およびエタノール工場からの排水を、最近調査した。結果は Table 2.17.1 に示すとおりである。バイオガスの生成では、キャッサバ工場の潜在能力が最も高く、第2位のエタノール工場の2倍以上であった。バイオガス生産潜在力が低い工場では、排水管理システムが優れており、副産物の利用がうまく行われていると考えられる。

Table 2.17.1. Potential biogas production from different industries.

Industries	Biogas data in 2005		MW _e	Energy substituted by biogas		
	Production (Mm ³ /y)	Energy equiv. (ktoe/y)		Plant capacity (GWh/y)	%Plant capacity	Fuel oil equiv. (M L)
Cassava	344	167	57	413	82.2	158
Ethanol	149	97	20.5	179	100	69
Oil palm	84	39	14	100	82.2	39
Canned pineapple	13	6	3.7	16	50	6
Sugar	4.2	0.7	3.6	5	27.4	0.3
Total	594.2	309.7	98.8	713		272.3

Source: TRF (Thailand Research Fund) final project report, 2007

Remarks: fuel oil equivalent is calculated based on methane content in biogas with the following conversion factors: 1 m³ of CH₄=33.8 MJ, 1 m³ of biogas=0.46 liter of fuel oil equiv.=1.2 kWh

2.17.2 バガス

バガスは、製糖工場でサトウキビの茎を圧搾し糖汁を抽出した後に残される、繊維質の固形廃棄物である。通常サトウキビを加工した場合、そのほぼ25～30%がバガスとなる。タイ国における1998年～2007年のサトウキビ生産量43.5～74.3 Tg/年（4350万～7430万t/年）からは、ほぼ10.9～22.3 Tg/年（1090万～2230万t/年）のバガスが産出される。現在、タイの製糖工場から出るバ

ガスのほとんど全部が、エネルギーを生み出すためのバイオマス燃料として使われており、その一部は工場内で製糖用に使用されているが、他の用途に使用されているのはごく僅かである。Fig. 2.17.1 に示すとおり、2007 年には送電線網を持つバイオマス発電所の半数以上が、燃料としてバガスを使用している。

1994 年以降、バガスによる発電を行っている小規模発電業者 (SPP) および零細発電業者 (VSPP) は 37 ある。設備容量は 780 MW であり、そのうち 300 MW が送電線網を持つ発電所へ売却されている。最近のバガス発電所の急激な増加は、政府が発電を積極的に支援しているためである。

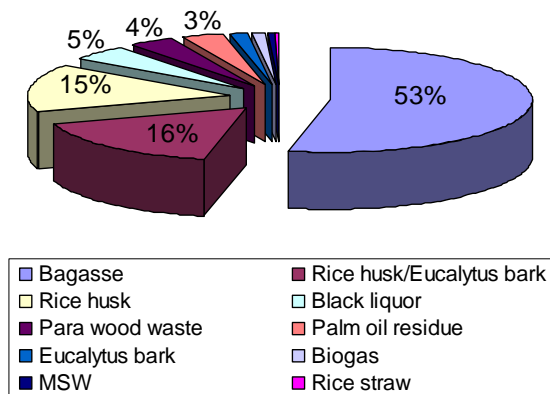


Fig. 2.17.1. Breakdown of biomass power plants by fuel type in 2007.

Source: Adapted from Energy for Environment Foundation (<http://www.efe.or.th>)

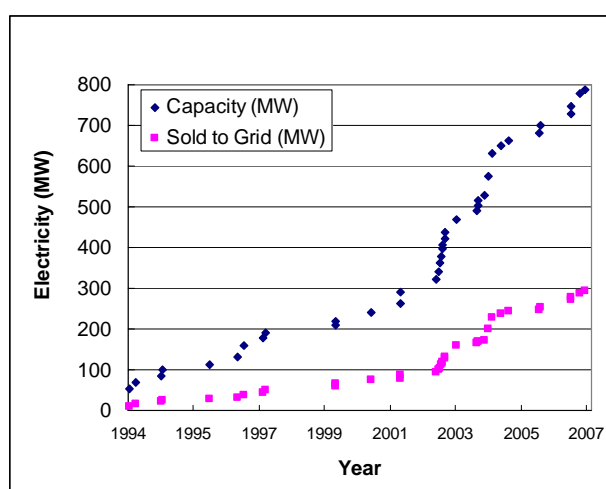


Fig. 2.17.2. History of baggase power plants in Thailand.

さらに、バガスから生分解可能な食品容器 (下図参照) やパーティクルボードなどの他の高付加価値製品を作ることにも可能である。発電所から出るバガスの残留物と灰を圧縮して、重さ 1 個 3.2 kg、強度 80~90 kg/cm²、1 個当り 4 パーツの建設用レンガを製造できる (通常建設用レンガは、重さ 5.8 kg、強度 70 kg/cm²、1 個当り 8 パーツ)。



Fig. 2.17.3. Biodegradable food container from bagasse fiber.

2.17.3 トウモロコシの穂軸

タイ国においてトウモロコシは、最も経済的な農作物のひとつではないが、トウモロコシ加工産業が掲げる廃棄物ゼロの理念を実現するために、発電や固形燃料としてトウモロコシの穂軸を利用することが増加している。以下のグラフは、世界のトウモロコシ生産量を示しているが、その半分以上をアメリカ合衆国が占め、世界で最も高い収量を上げています。中国にはアメリカと同程度の広さのトウモロコシ畑があるが、収量が低いため、生産量はアメリカのわずか半分でしかない。

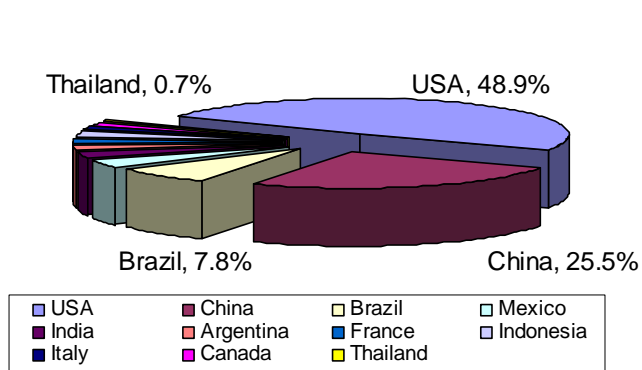


Fig. 2.17.4. World leading countries in maize production in 2006

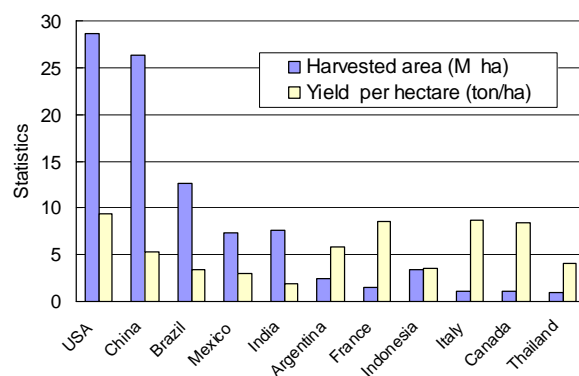


Fig. 2.17.5. Harvested area and yield of maize in 2006.

過去 10 年間に、タイでは収量が徐々に増加しているが、減少する農地を補うほどではなく、その結果、右のグラフに示すとおりトウモロコシの生産は減少している。2006 年では、収穫面積 900 km² (90 万 ha) に対して平均収量は 411 g/m² (4.11 t/ha) となっている。

タイで生産されるトウモロコシのほとんどは、食品および飼料工場で加工され、穂軸は工場の固形廃棄物として残る。2006 年には、330 Gg (33 万 t) の穂軸が出たと報告されており、そのうち 200 Gg (20 万 t) が、タイ北部のうち中央に近いペッチャブーン (76 Gg (7 万 6 千 t))、ターク (35 Gg (3 万 5 千 t))、ナコンサワン (33 Gg (3 万 3 千 t)) 諸県からのものである。この穂軸は通常乾燥してから、発

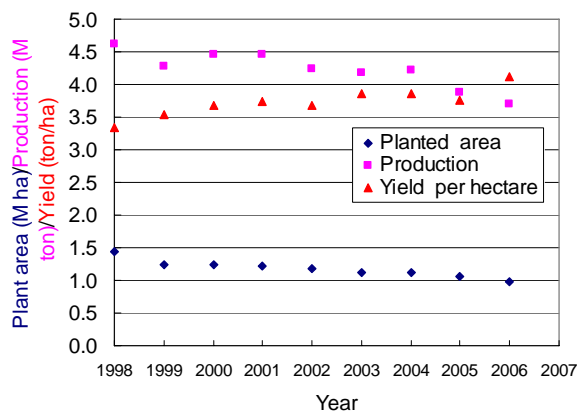


Fig. 2.17.6. History of maize statistics in Thailand

電用蒸気を生成するためにボイラーで燃やされる。たとえば、Pornvilai International Group 社のエタノール工場は 10 MW の発電規模である。

穂軸の高付加価値製品としてはトウモロコシの炭がある。まず 900°C~1000°C に熱して結合剤を入れ、ペレット状にする。最終的には 12 時間 120°C で乾燥し、水分 5% 未満の炭が出来上がる。

2.17.4 糖蜜

糖蜜は、サトウキビから砂糖を精製するときに出る副産物である。糖汁から砂糖を抽出した後にこの黒い濃いシロップが残る。タイでは、1084 年に施行された「キビと砂糖法」によって、キビと砂糖委員会 (OCSB) が製糖産業を緊密に規制している。製糖工場とサトウキビ栽培者間で公正な利益分配が行われるために、OCSB が重要な役割を果たしている。

Fig. 2.17.7 は、45 ある製糖工場すべてを赤で示し、ほぼ 1 万 km² (100 万 ha) のサトウキビ畑(緑)が、49 県にまたがる 4 つの地域に散在していることを示している。糖蜜の生産量はサトウキビの生産量に大きく依存している。一般には、サトウキビ 1 Mg (1 t) 当りほぼ 45~50 kg の糖蜜が産出され、糖蜜 1 Mg (1 t) から、260 L のエタノールが生産される。2007 年のサトウキビの収穫量 60 Tg (6000 万 t) から、3 Tg (300 万 t) の糖蜜が産出される。この 3 Tg (300 万 t) の糖蜜のうち 1 Tg (100 万 t) を、アルコール飲料、酵母、調理用ソース、グルタミン酸 1 ナトリウム (MSG)、酢、家畜の飼料等の生産工場が使用し、2 Gg (200 万 t) はエタノール生産に使われている。エタノール生産量は、年間合計で約 520 dam³ (5 億 2000 万 L)、あるいは 1 日 14 dam³ (140 万 L) に上る。

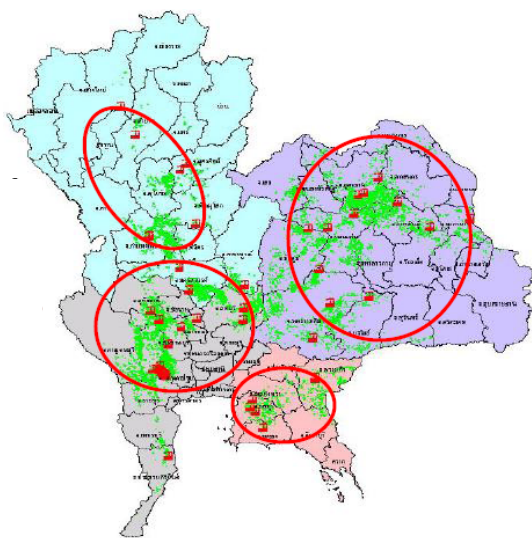


Fig. 2.17.7. Sugarcane plantation

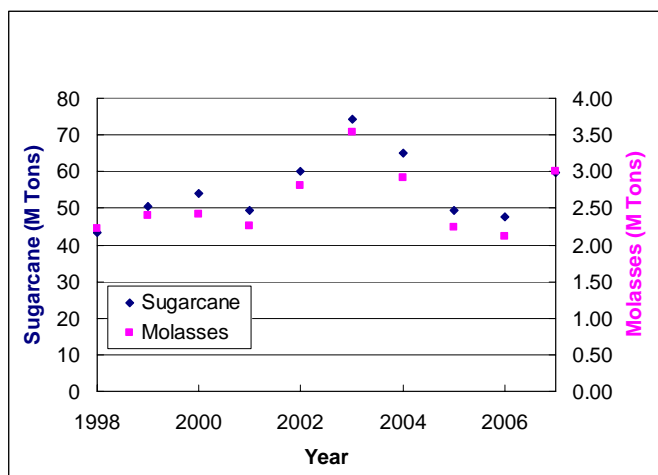


Fig. 2.17.8. Production of sugarcane and

(green) and sugar mills
(red) in Thailand

molasses in Thailand

エネルギー省は当初、燃料用エタノール工場を許認可制としていたが、後に撤廃した。現在、合計7つの燃料用エタノール工場(6箇所が糖蜜/砂糖を原料とし、1箇所がキャッサバを原料とする)が稼働し、1日の生産可能容量はほぼ1 dam³ (100万L)である。12の工場が新たに建設中であり、その半数は原料としてキャッサバを使用する予定である。追加される総生産可能容量は、1日1.97 dam³ (197万L)になる。エタノールの生産容量を増加するこの動きは、91と95オクタン価の両方にガソリンにおいて、エタノールを10%混合したガソリン、いわゆる「ガソールE10」を使用するように奨励する政府の主導によるものである。2008年1月1日以降、限られたガソリンスタンドで、オクタン価が95のガソールE20、つまり20%エタノールを混合したガソリンが販売される予定である。

糖蜜輸出市場で最近、タイは世界最大の輸出国となった(2004年は4160万ドル規模)。2位はアメリカ合衆国、3位はグアテマラである。輸出のほぼ37%がASEAN諸国向けであり、53%が他のアジア諸国向けである。タイ国に近隣するその他の糖蜜輸出国として、フィリピン、インドネシア、オーストラリアが挙げられる。

第3部 バイオマスの物理的変換

3.1 薪生産

3.1.1 総論

薪は古典的なエネルギー源であり、現在でも多くの途上国では重要な民生エネルギー源である。20世紀後半、石油によって用途の多くを奪われたとはいえ、伐採される木材の半分以上を薪が占めており、世界エネルギー消費の14%、途上国では36%に達する。

しかし地域によっては人口増加とともに木がしだいに減少し、薪収集が遠距離化して調理用の薪さえ集めにくくなっている。アジアにおいては、急傾斜の山林からの搬出が困難で林地の多くの資源は使い難い状態にある。

Fig. 1の左側、原木からの炉前までの薪供給サイドにおいては、現在、その資源量問題よりも圧倒的に原木搬出段階でのエネルギー消費（あるいはコストアップ）が大きな課題になっている。補助すべき外部エネルギーを $*e$ 、薪として使用可能なエネルギーを E とすれば $*e$ の総和が大きくなり

$$\Sigma *e > E$$

となれば、エネルギーシステムとして成立しなくなる。この課題は、炉における使い易さを求めてチップ化やペレット化など加工度を高める場合においても重要である。

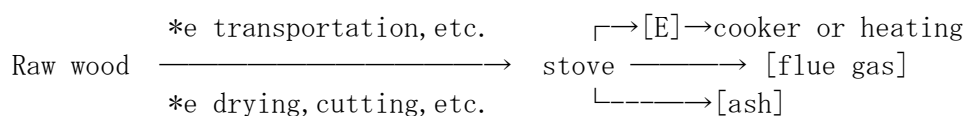


Fig. 3.1.1. Material- and energy-flow around stove in firewood system
 $*e$: energy supply from outside, E : useful energy

また Fig. 3.1.1の右側、薪使用サイドにおいては、特に旧式のかまど型の厨房機器のエネルギー効率が低いことが重大な問題である。

さらに、不完全燃焼を伴い易い小型燃焼器具においては室内空気の衛生などが問題視されている。煤塵、一酸化炭素 (CO)、タール分、メタン外揮発性有機物 (NMVOC)、多環芳香族 (PAH、発ガン性)

などが指摘されている。

薪燃料の灰分は石炭の灰分（10%前後）に比べて約1桁低いため、ふつう大問題にならないが、排出は物質バランス上、重要である。木灰は重要な肥料成分、カリウムを多く含むのでシステムの持続可能性を維持するには、林地への返送・還元が必須である。

草本植物には、灰分が木質の5-20倍も多く含まれるので、ワラ、モミガラ、バガスなどから人工薪を作る場合には、灰の処分はシステムの行方を左右する問題になる。

なお、植物体の発熱量はいずれの樹種でも絶乾物は約20GJ/t（石油の約半分）であり、ほとんど含有水分によりきまる。さらに、かさ高のため長距離輸送に向かない。中山間地域の里山林における木質燃料利用が叫ばれるゆえんである。

3.1.2 薪の供給

薪の資源量の前提を考察する。FAO（国連食料農業機関）によれば世界森林面積は39.5億haで僅かに減少(-0.2%/年)傾向にある。そして森林の1次成長量は、51億m³/年以上と推定されるのに対して丸太総生産量は産業用材16億m³、燃料材18億m³と小さい。そして森林面積一定でもより成長速度の高い人工林が少しずつ増加しているので、当分の間は緩やかな経済成長に見合う程度の供給増大には耐えられる。

さらに用材生産ではそれに見合う林地残材、間伐材が発生しているので、もし搬出・輸送技術が発達すれば、供給可能量は飛躍的に拡大する。だが日本およびアジア各国に多い急傾斜山林からの搬出は、Fig. 3.1.2における*e-1が非常に大きくなるため資源利用不能になっている現状がある。*e-1は距離に比例し同時に勾配の数乗に比例するとみられるが、詳細な評価研究はまだなされていない。かさ密度は輸送性を支配する重要因子である。充填率はばら積み柴1/4~1/3、チップで最高1/2、ペレットで0.6程度である。

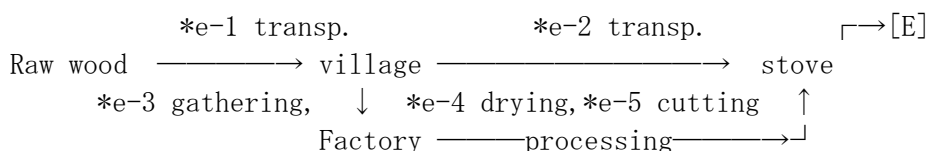


Fig. 3.1.2 Material- and energy-flow before stove in firewood system
*e1, *e 2, *e 3... :energy supply from outside,

急傾斜輸送は、日本のNPOによってスライダーを使って山林からふもとの里山村まで搬出する実験

(Fig. 3.1.3) が行われた。小径木を対象にして 20 度程度の勾配において山中の柴類搬出に成功している。無動力・省力的で、傾斜利用できる点で注目し値する。

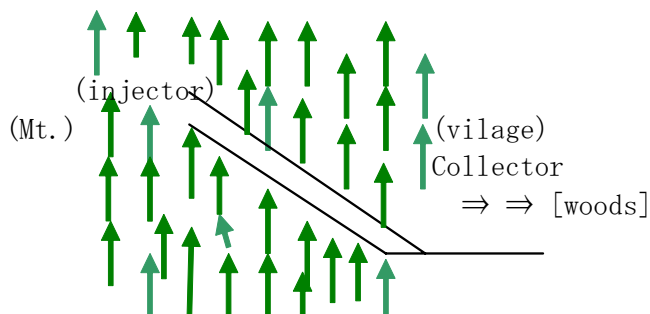


Fig. 3.1.3. Carrying-out system for mountain- fire woods

原木を薪にするには炉の奥行きが 50cm 未満であるため、玉切りを行う。また燃焼性を改善へ向けて表面積を拡大するため薪割りをして長短比（アスペクト比）が 10-20 に調整する。これらの制限は結構煩雑であるため、碎木を圧密し中空の円柱状にした人工薪（例：オガライト、本稿 3.2 Pelletizing 参照）などが登場している。比表面積の拡大、自動供給性の向上などのためチップ化やペレット化など加工度を高めると次の順序に並ぶが、同時にプロセスエネルギー消費(*e-4、*e-5)およびコスト上昇も避けられない。

Raw wood > fire wood > chips, briquette > pellet

薪の水分は、生木のままで約 50%、風乾物では 15-30%（気候による）である。いずれも可燃性であるが、水の吸熱量（-2.26GJ/t）の分は確実にエネルギー損失する。一般バイオマスでは含水分が 2/3 を越せば、まだ発熱量は残っていても、火炎温度に到達できなくなるため失火するのが普通である。なお、薪の乾燥処理はプロセスエネルギー消費を起こすが、燃焼時の発熱量増大により一部分は取り戻せる。

3.1.3 薪の利用

薪は簡単な器具で燃焼できるが、下記のような燃焼モードの変遷を伴うので制御は複雑になる。チャー（炭化物）燃焼は全燃焼の約 10-20%である。

燃焼加熱乾燥 → 加熱乾留 → 火炎燃焼 → チャー燃焼

(~150°C, 吸熱) (250~400°C, 吸熱) (主たる燃焼) (おき火: 緩慢燃焼)

もし空気供給が不足であると、乾留段階からはもっとも有害なタールが発散される。火炎燃焼では不完全燃焼でCOと煤塵（炭粒）が発生し、タールの一部から熱分解で発ガン性のPAHも生成する。

Fig. 3.1.4 の排煙に、これら汚染物質が入ってくるのを防止するために理論空気量よりも少し過剰の空気を使い、高温と酸素濃度を維持する。

安全な薪燃焼には空気比 1.25~1.4 が一般に用いられる。空気比を上げ過ぎると火炎が希釈され温度低下するので、過剰空気を 2 次空気として分離供給するとよい。空気比 1.0 に接近しても完全燃焼させるために、燃焼触媒網を上置する装置が市販されているが、通気が悪くなることおよび触媒劣化で毎年更新管理などの煩雑さがある。

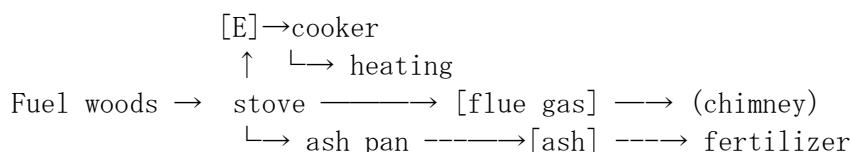


Fig. 3.1.4 Material- and energy-flow after stove in fire wood system
*e1、*e 2、*e 3・・・ :energy supply from outside,

Fig. 3.1.4 の上部には、熱利用を示す。暖房には熱損失が少ないが、調理用には鍋への熱伝導が必要なため有効な熱が取りにくく、調理兼用暖房機の工夫の要るところである。

ストーブの天板の最高温部位を調理鍋に指定するのが一般的である。沸騰する必要のない温水給湯用には、より低温の天板が割り当てられる。

参考文献

- Forestry and Forest Products Research Institute, Japan, Ed. (2006) : "Shinrin ringyono shorai yosoku", p.31, p.411 (in Japanese) .
 H.Sano : J.J.Soc.Mec.Eng.(2005), 108(1045), pp.926-927. (in Japanese) .
 T.Ogi in "Biomass Handbook",Japan Institute of Energy Ed.,Ohm-sha,2002,p.5 and p.16 (in Japanese)

3.2 ペレタイジング

3.2.1 ペレットとペレタイジングとは

ペレタイジングとは原料をペレット形状に加圧成型することを言う。固体燃料、薬品、飼料、鉱石など広範囲な原料がペレット化可能である。固体燃料に関して、それらは木質ペレット、オガラ

イト（木質ブリケット）石炭ブリケットあるいは複合燃料と呼んでいる。Fig. 3.2.1 (a)に示した木質ペレットは鋸屑、研磨屑から製造している。直径は6～12 mmで長さは10～25 mmである。Fig. 3.2.1 (b)、(c)は大型サイズの木質ペレットでそれぞれオガライト（木質ブリケット）と籾殻ブリケットである。直径は50～80 mm、長さは300 mmである。Fig. 3.2.1 (d)は石炭とバイオマスの複合燃料でCCBあるいはバイオブリケットと呼んでいる。



(a) Wood pellet
Japan

(b) Ogalite
Japan

(c) Rice husk briquette
Nepal

(d) CCB
Japan

Fig. 3.2.1. Various types of briquette.

(a) 木質ペレット

籾殻ブリケットは別にして木質ペレットと木質ブリケットは以下に示した製造工程を経て生産される。

(1) 乾燥工程

一般に原木の含水率は50%程度で原料の粉砕およびペレット化に適した水分値10～20%にするために乾燥する必要がある。大きいサイズの原料はロータリーキルンで乾燥し、小さいサイズの原料は気流乾燥機で乾燥するのが一般的である。

(2) 粉砕工程

原料は製造するペレットのサイズに合わせて粉砕する。とくに全木あるいは大型サイズの木質の場合、乾燥後の含水率を一様にするため、乾燥前に粉砕する。また、原料が籾殻の場合にはこの工程は必要ない。

(3) ペレット製造工程

ペレット製造装置はFig. 3.2.2と3.2.3に示したように原料供給装置、ローラー、ダイスから構成されている。Fig. 3.2.2に示した装置は木質ペレット製造装置で、この型のペレット製造装置は世界的にもっとも一般的なものとなっている。Fig. 3.2.3木質ブリケット製造装置および籾殻ブ

リケット製造装置の概略図である。

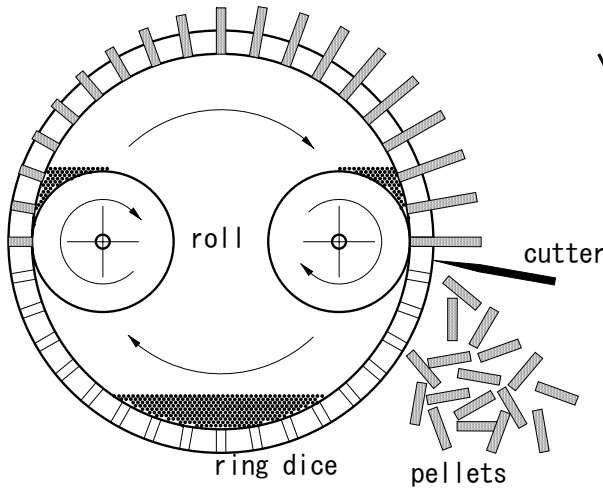


Fig. 3.2.2. Pelletizer for wood pellet.

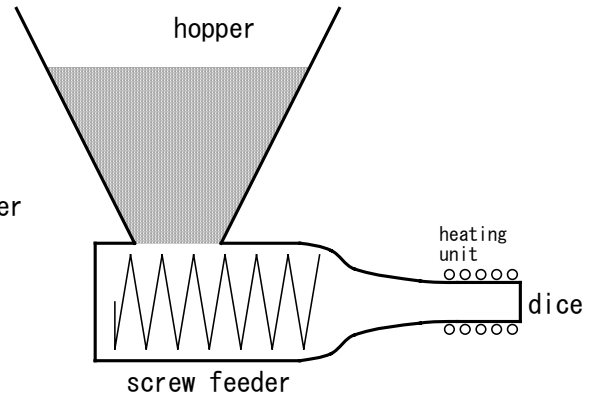


Fig. 3.2.3. Briquetting machine for wood and rice husk briquette.

(4) 冷却工程

製造直後のペレットは高温・高湿度状態であるため冷却する必要がある。

(5) 選別工程

不良品は選別機で取り除かれ原料乾燥用のエネルギーとして利用される。

(b) CCB (石炭とバイオマスの複合燃料；バイオブリケット)

CCB は第二次オイルショックを契機に灯油代替燃料として日本で開発された。石炭とバイオマス（ともに 2 mm 以下の粒度）を混合し Fig. 3.2.4 に示した装置で高圧成型した石炭ブリケットの一種である。CCB の基本的な原料配合比は重量比で石炭 70~90%、バイオマス 10~30% で脱硫剤として当量比 1~2 の消石灰あるいは石灰石を配合することもある。石炭はリグナイトから無煙炭まで広範囲に利用でき、バイオマ

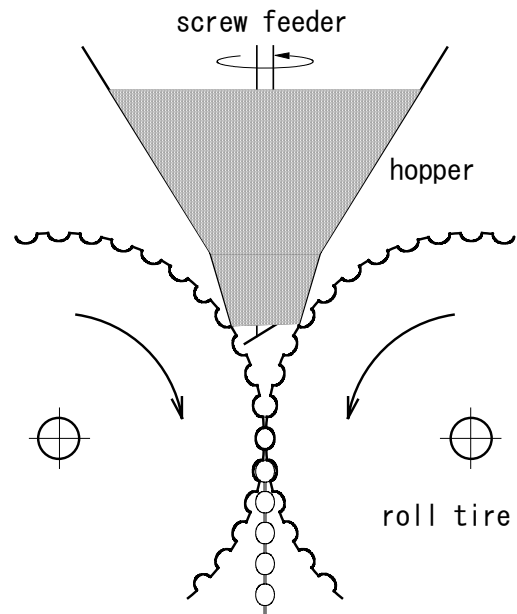


Fig. 3.2.4. Briquetting machine for CCB.

スは農産廃棄物、廃材など植物性のものであればほとんどが利用可能である。この成型燃料の特徴はバイオマスを混合しているため着火性・燃焼性が良好で煤煙の発生が少なく、燃焼効率が高いため省エネの効果がある。脱硫剤を配合することによって亜硫酸ガスの発生を 50～80%抑制できる。この技術はクリーンコールテクノロジーとして多数の国へ技術移転され薪・石油・炭の代替燃料として有望視されている。とくに中国においては省エネ、二酸化炭素発生量の削減、酸性雨の防止の手段として技術支援要請が増加している。

3.2.2 ペレットと CCB の特徴

(a) 木質ペレット

木チップ、薪と比較した木質ペレットの特性は以下の通りである；ハンドリング、着火、燃焼が簡単である、燃料の形状、性状が一様である、燃焼時の有害ガスの発生が少ない、輸送効率、エネルギー密度が高い。

(b) CCB

CCB にはバイオマスを 10～30%配合している。一般に、バイオマスは、発熱量が低い低いという欠点がある反面、着火性、燃焼性に優れ、煤煙発生量、灰分量が少ない石炭にはない特性を持っている。この特徴が低品位炭の利用を可能としている。

3.2.3 ブリケット製造のための基礎試験

(a) 木質ペレット

ペレット製造に影響を大きく及ぼす因子として圧力、温度、圧縮時間、原料粒径、水分、化学成分が考えられる。ペレット製造の境界条件については未だ不明確な点が多くオペレータの経験を基に製造条件を決定しているのが現状である。原料によって異なるがその値は成型圧力は 70Mpa、成型温度は 100～150℃である。しかしながら、木質に含まれるリグニン、糖質、ペクチンがバインダーの役割をしているのは疑う余地がない。

(b) CCB

CCB の製造には、高圧ロールタイプ成型機を使用している。タブレットテストは CCB を製造する前の基礎試験である。この試験は最適な物理的特性および燃焼特性を持つ CCB を生産するための成型圧力、成型温度、原料混合比などの諸条件を決定する必要不可欠な基礎試験である。

試験用タブレットは小型プレス金型(d=25 mm)に、石炭とバイオマスの混合試料を入れ、所定の成型温度と成型圧力で成型して製作する。タブレットの強度測定は直径 20 mm の綱球による球面圧

縮を採用した。Fig. 3.2.5 および Fig. 3.2.6 に示したように木粉混合量の増加、成型温度の上昇、成型圧力の上昇によってタブレットの破壊強度は増加する。とくに、成型温度が 50℃以上では急激に破壊強度が高くなる。この条件では通常のハンドリングに充分耐える破壊強度 100 kN の CCB の成型が可能となる。なお、高圧ロールプレス成型機では製造時にロールタイヤと原料との間に剪断応力が生じ、原料はおよそ 70~80℃に加熱されるため、著しく成型性の悪い原料を利用しない限りブリケット製造時には加温の操作は行わない。

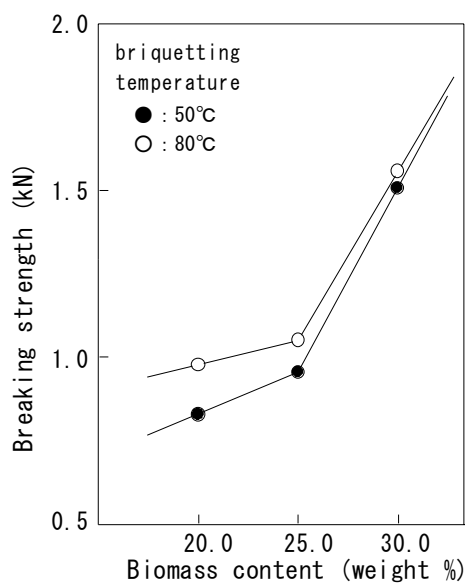


Fig. 3.2.5. Effect of biomass content

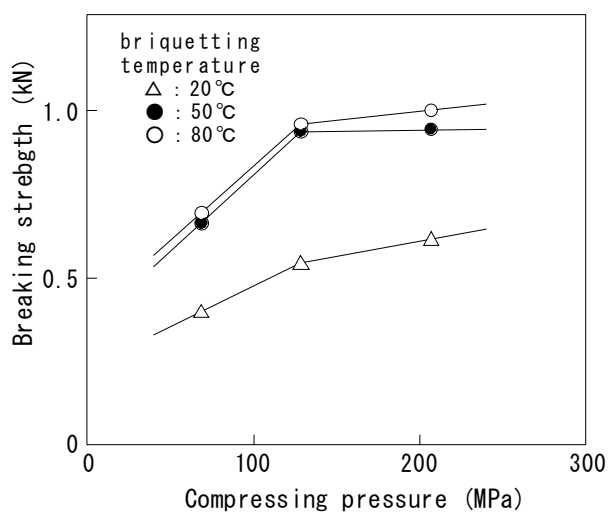


Fig. 3.2.6. Effect of compressing pressure

3.2.4 エネルギー効率

中国での CCB 利用が経済性、周辺環境にもたらす効果は以下のように推定される。CCB には 20% のバイオマスを配合しているため石炭の消費量は 20%削減され、燃料の燃焼性の改善により、既存の石炭焼きボイラーよりも熱効率が 25%改善される。年間 100 万トンの CCB が消費されるなら石炭消費量は年間 40 万トン、煤煙排出量は年間 5,000 トン、二酸化硫黄の排出量は年間 15,000 トン削減されると推算される

参考文献

Johanson, J. R. ;The Use of Laboratory Tests In The Design and Operation of Briquetting Presses, Proceedings, IBA, 13, 135(1975)

Maruyama, Coal-wood formed fuel Binder effect of woody materials, Hokkaido Industrial Research Institute, No.279, 183(1980)

Maruyama, Briquetting characteristics of coal-wood composite fuel, Report of Hokkaido Industrial Research Institute, No.282,195(1984)

Groving, D. A. I.;Thermal Softening of Lignin, Hemicellulose and Ceullulose, Pulp Paper Mag., T-517～527(1963)

The Japan Institute of Energy, Biomass Handbook, p224-228(2002)

3.3 パーティクルボード

3.3.1 パーティクルボードとは

木質複合ボードには多くの名称と定義がある。パーティクルボードは、リグノセルロース材料(大抵は木材) 削片 (繊維でない) から製造される板製品の総称であり、合成樹脂やその他の適正なバインダーを加え熱圧成型プロセスにより、削片を接着させている (ASTM D 1554)。性能向上のために他の材料を混ぜることがある。パーティクルボードの分類は国により異なる。例えば、日本工業規格 (JISA 5908) は、パーティクルボードの種類を 1) 表裏面の状態、2) 曲げ強さ、3) 接着剤、4) ホルムアルデヒド放散量および 5) 難燃性によって区分する。本章でのパーティクルボードはファイバーボード (繊維板) を含まない。

ファイバー、パーティクル、ウエファー等木材小片を接着成型した製品は、木工残廃材、未利用材、低質材、農業廃棄物から製造可能である。さらに、樹皮、林地残材、工業廃材を製品の中に混入することができる。複合ボードの製造により、未利用天然資源を有用な材料へ転換することができる。

3.3.2 パーティクルボードの生産と消費

2006年4月現在、稼働中のパーティクルボード工場は16工場である。同年10月の国内パーティクルボード生産量は1,234千 m^3 、輸入量は391千 m^3 である。用途別では、家具建具が60%、建築が37%である。建築廃材のリサイクル法により、2006年には再資源化率の目標が60%となったため、木質ボード (パーティクルボード、繊維板) 原材料の61%が建築廃材由来となった。

3.3.3 パーティクルボードの製造

Fig. 3.3.1 にパーティクルボードの製造過程を示す。

重要な一次処理工程は廃材からボードの原材料となるエレメントをつくることであり、図では「particle formation process」の部分をさす。建築廃材と木材産業廃材は別ラインで流され、いくつかの工程を経て削片化と異物除去を行う。まず、原材料の廃材はせん断式破砕機で一次粗破砕され、磁選され金属異物除去された後、ハンマークラッシャーで二次破砕される。その後スクリーンで分級、気流により選別して砂とコンクリートなどの異物を除きサーチコイルで非金属を除去、最終的に原材料となるパーティクルが完成する。二次処理工程はボードの製造である。一次工程で製造した原料を、リングフレイカーを通し、均一な厚さのパーティクルを製造し、その後乾燥、分級を行う。

工場の処理工程で出るダストが乾燥炉の熱源に用いられることが多い。接着剤をブレンドするが、三層ボードでは表層と芯層で別々のブレンダーを用いる。接着剤塗布後、成型され、熱圧され、養生後に研磨される。パンクを含む製品が非破壊検査によって除去されることもある。研磨後、検査され出荷される。

工場の処理工程で出るダストが乾燥炉の熱源に用いられることが多い。接着剤をブレンドするが、三層ボードでは表層と芯層で別々のブレンダーを用いる。接着剤塗布後、成型され、熱圧され、養生後に研磨される。パンクを含む製品が非破壊検査によって除去されることもある。研磨後、検査され出荷される。

3.3.4 マテリアルリサイクルのためのパーティクルボード利用

パーティクルボードの製造は木質材料のマテリアルリサイクルの重要な工程であり、この工程がないと木質廃棄物として埋め立てられるか焼却されるかになる。リサイクル材料に他のエレメントを混ぜて高機能化することができる。例えば、芯層に繊維が短くなったリサイクル材料、表層に長繊維のエレメントを用いて強度低下を防ぐことができる。パーティクルボードの製造は成熟産業で

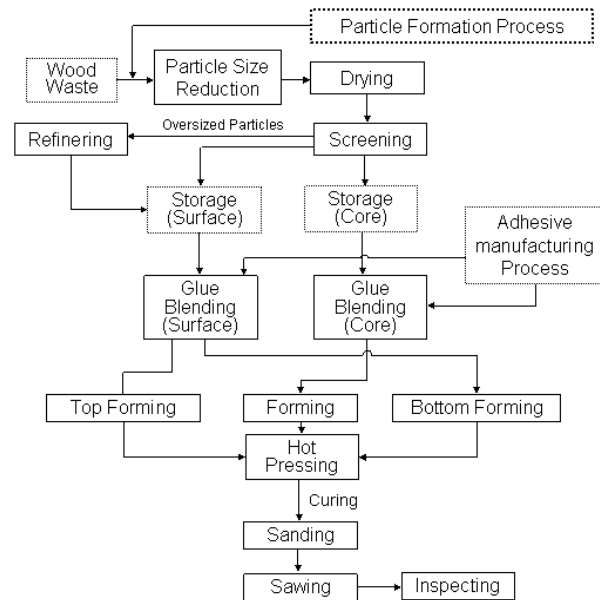


Fig. 3.3.1. Particleboard Manufacturing Process. Courtesy of Saito, Y., Tokyo Board Industries, Co., Ltd.

あるが、各工程の能率を上げる必要がある。原油価格は上昇し続け、輸送、接着剤、工場の稼働コストは上昇する中、原料木質廃材チップの入荷にあたっては他産業と競争しなければならない。木質バイオマスのエネルギー利用を促進する政策のため、状況はさらに悪くなっている。農林水産省は将来を見据えたバイオマス・ニッポン政策を提示している。1) 国民の啓蒙、2) バイオマス由来輸送燃料の導入、3) バイオマスタウン構築、4) 木質バイオマスをふくむバイオマス利活用技術の開発、5) バイオマス製品エネルギーの利用増進、6) アジア諸国等海外との連携。地域廃材を利用する大抵のパーティクルボード産業は、廃材利用を促進させマテリアルリサイクルを促進させるとともに、製造原料とならない木質廃棄物のエネルギーリサイクルにも貢献している。

3.3.5 木質パネルを含む木質バイオマスの統計

木質バイオマスとは樹皮、鋸屑、製材・単板・合板・エンジニアードウッド工場端材をいう。2006年の統計資料では、木質バイオマス総量は10,782千m³、10,197千m³（95%）はバイオマス源として利用され、残りは廃棄されている。木質バイオマスの種類は、1) 4408千m³（43%）が木材チップ、2) 2330千m³（23%）エネルギー利用、3) 2256千m³（22%）畜産敷料、4) 580千m³（5.7%）堆肥土壌改良剤、5) 258千m³（2.5%）木質ボード製造、である。エネルギー利用される2330千m³（23%）は、1) 木材乾燥施設熱源用（1550千m³）、2) 発電施設用（595千m³）、3) ペレット等製造用（46千m³）である。

3.3.6 アジアにおける実用化技術

パナソニックマレーシアは木材より早く成長する非木質系素材、ケナフに着目し、ケナフボード製造のために、環境に優しいシステムを開発した。公害を減らし、豊かな珊瑚礁を保護するエコシステムとなっている。ケナフボード製造技術自体は、中国のケナフを用いて京都大学との共同研究によって開発され、2005年、ケナフボードに見合う品質のケナフの現地栽培に成功した。ダストとして回収される30%のケナフはバイオマス発電源に利用され、焼却灰は肥料となる。

<http://panasonic.co.jp/ism/kenaf/index.html>

参考文献

American Society for Testing Materials (ASTM) Standard. D 1554 Standard Terminology Relating to Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. (2001)

Japanese Industrial Standard (JIS) A 5908. Particleboards. (2003)

- “Field survey on use of woody biomass,” Statistic Department, Minister of Agriculture, Forestry and Fishery. (2006)
- Statistics of Ceramics and Construction Materials, Ministry of Trade and Industry, ISBN:9784903259192. (2006)
- Thomas M. Maloney, Modern Particleboard. ISBN 0-87930-063-9. Published by Miller Freeman Publications Inc. (1977)
- Walter T, Kartal S.N, Hang W.J, Umemura S, Kawai S. Strength, decay and termite resistance of oriented kenaf fiberboard. *J Wood Science*, **53**(6) 481-486 (2007)
- S. Kawai, K. Ohnishi, Y. Okudaira and M. Zhang. Manufacture of oriented fiberboard from kenaf bast fibers and its application to the composite panels. The 2000 International Kanaf Symposium, p.144-148, Oct. 13-14, Hiroshima (2000)
- K. Ohnishi, Y. Okudaira, M. Zhang, and S. Kawai. Manufacturing and properties of oriented medium density fiberboard from non-wood lignocellulosic fibers I. *Mokuzai Gakkaishi*, **46** (2) 114-123 (2000) (in Japanese)
- S. Suzuki. The state of the arts on current timber structures. V: The state of the arts on reuse and recycle of wooden structures. *Journals of the Society of Materials Science, Japan*, **53** (4) 465-470 (2004) (in Japanese)

第4部 バイオマスの熱化学的変換

4.1 燃焼

4.1.1 総論

(a) 燃焼とは

燃焼とは多量の発熱と発光を伴う発熱化学反応で、反応によって発生する熱エネルギーで自発的に反応が継続される現象である。バイオマスを燃料とする場合、工業的には空気や酸素とバイオマス中に含有する炭素・水素・酸素・燃焼性硫黄・窒素と反応させる発熱性酸化反応を燃焼と言う。燃焼の過程では、熔融、蒸発、熱分解という前段階を経て気相反応か表面反応、またはその両方により燃焼反応が進行する。実際の燃焼反応は、蒸発、混合、拡散、対流、熱伝導、放射、発光などの複雑な現象が非常に早い速度で複合的に進行する。気体燃料では気相中で直接燃焼する予混合燃焼や拡散燃焼が、液体燃料では、表面蒸発後に可燃性ガスとして気相で燃焼する蒸発燃焼や、重質油等でみられる蒸発燃焼とその熱により燃料部分が分解しながら燃焼する分解燃焼が、進行する。

(b) バイオマスの燃焼形態

固体であるバイオマスの直接燃焼の燃焼形態は、蒸発燃焼、分解燃焼、表面燃焼、いぶり燃焼がある。蒸発燃焼では、比較的融点の低い分子構造で簡単な成分を有する燃料が加熱により溶解、蒸発し気相中で酸素と反応し燃焼する。分解燃焼では、加熱による熱分解で生成したガス（成分は H_2 , CO , C_mH_n , H_2O , CO_2 ）が気相中で酸素と反応、火炎を形成して燃焼する。通常は最後にチャーが残り表面燃焼する。表面燃焼は、木炭のように揮発分をほとんど含まない炭素のみの成分である場合に進行し、酸素または二酸化炭素や水蒸気が固体表面や内部に存在する気孔に拡散して、表面反応し燃焼するものである。いぶり燃焼は、おき燃焼とも言われ木材等の反応性の良い燃料で表面燃焼が揮発分の着火温度より低い温度で熱分解反応を続けるものである。煙に強制点火するか、発火点より温度が上がると有炎燃焼となる。実際のバイオマスの工業的に利用される直接燃焼においては、分解燃焼と表面燃焼が主流と考えてよい。

(c) 燃焼形式

燃焼用空気は工業的にはバイオマスの燃焼に必要な理論空気量に対し余剰分を含めて供給する。

余剰空気比率が大きすぎる場合、燃焼温度の低下や熱効率の低下となる。バイオマスの燃焼方法としては、火格子燃焼（固定火床及び移動火床）、流動床燃焼、回転炉床燃焼、バーナ燃焼が利用されている。Table 4.1.1に燃焼方法の各形式の特長を示す。

Table 4.1.1 Combustion type and feature of biomass

Combustion method	Combustion type	Features
Fixed bed combustion	Horizontal/Inclined grate Water-cooling grate Dumping grate	Grate is level or sloping. Ignites and burns as surface combustion of biomass supplied to grate. Used in small-scale batch furnace for biomass containing little ash.
Moving bed combustion	Forward moving grate Reverse moving grate Step grate Louver grate	Grate moves gradually and is divided into combustion zone and after-combustion zone. Due to continuous ash discharge, grate load is large. The combustion obstruction caused by ash can be avoided. Can be applied to wide range of fuels from chip type to block type.
Fluidized bed combustion	Bubbling fluidized bed combustion Circulation fluidized bed combustion	Uses sand for bed material, keeps fuel and sand in furnace in boiling state with high-pressure combustion air, and burns through thermal storage and heat transmission effect of sand. Suitable for high moisture fuel or low grade fuel.
Rotary hearth furnace combustion	Kiln furnace	Used for combustion of high moisture fuel such as liquid organic sludge and food residue, or large waste etc. Restricted to fuel size on its fluidity.
Burner combustion	Burner	Burns wood powder and fine powder such as bagasse pith by burners, same as that for liquid fuel.

(d) 利用形態

バイオマスの燃焼による利用形態は、熱エネルギー転換を図る最も単純な方式で、化石燃料で経験した技術が適用できることや、バイオマスの利点である NO_x、SO_x、HCl、ダイオキシン類の発生が少なく、燃焼性に優れていることのため広く普及している。燃焼熱はボイラや熱交換器により、蒸気、温水などの熱媒体を利用して熱回収し、発電利用や熱利用される。地域熱供給や工業団地のエネルギーセンターでは廃木材や農産廃棄物を燃料とする熱併給発電が多い。籾殻、バガス、廃木材、オイルパーム廃、鶏糞等を燃料とする発電所や熱利用プラントが規模の大小を問わず多数存在する。

参考文献

Fujii, S. in "Baiomasu Enerugino Riyo, Kenchiku, Toshi Enerugi Sisutemuno Shingijutsu", Kuuki Chowa

Eisei Kogakkai Ed., 2007, pp.212-218 (in Japanese)

Mizutani, Y. in "Nensho Kogaku", 3ed., Morikita Shuppan, 2002, pp.169-181 (in Japanese)

4.1.2 コージェネレーション

(a) コージェネレーションとは

コージェネレーションとは一つのエネルギー源を二つ以上の利用可能なエネルギーに変換することだが、一般的には一つのエネルギー源から同時に電気と熱を取り出すことをいう。日本語では熱電併給、英語では Combined Heat and Power (CHP) という。コージェネレーションは電気だけを取り出す場合（ふつうの発電）と比べてエネルギー効率が高いため、エネルギーの有効利用の観点から注目されている。

(b) コージェネレーションのエネルギー変換

バイオマス原料から発電するためには、バイオマスの持つエネルギーを運動エネルギーに変えて発電機を回し、電気エネルギーを取り出す。バイオマスの持つエネルギーを運動エネルギーに変える主な方法としては、1) バイオマスを燃焼させて蒸気を作り、蒸気タービンを回す、2) バイオマスを熱分解または微生物によって分解して可燃性ガスを作り、そのガスを燃焼させてガスエンジンあるいはガスタービンを回す、などがある。いずれの場合も燃焼によって発生する熱エネルギーを運動エネルギーに変換するわけだが、すべての熱エネルギーを運動エネルギーに変換できないため、一部の熱は放出されてしまう。この熱エネルギーを回収して電気エネルギーと一緒に供給すれば、バイオマス原料の持つエネルギーの利用効率を高めることができる。このようにコージェネレーションは、エネルギー変換効率を高くするというメリットがある。

(c) 大規模プラントの可能性

大規模な発電所でもコージェネレーションは可能だが、発電所の近くに熱の需要がない場合は、利用されずに捨てられていることが多い。火力発電所や原子力発電所が海岸や大きな河川の近くに立地しているのは、熱を捨てるための水として大量の海水や河川水を使うためである。一方、発電所から出る熱を近くの工場に販売しているケースもある。これからは大規模な発電所を計画する際に、熱の供給先についても検討することが望まれる。

(d) 工場・集合住宅への適用可能性

工場や集合住宅では、電力と熱の需要に合わせてコージェネレーション設備を設計・設置することが可能である。熱は高温・高圧の蒸気から、暖房・給湯用の温水までさまざまな仕様があるが、低温、低圧のものほど回収・供給が容易である。またコージェネレーション設備を既設のボイラと組み合わせて、蒸気、温水を供給することもできる。バイオマスを原料とする場合、規模が小さく

なると発電効率が下がってしまう。直接燃焼・蒸気タービン発電の場合は発電出力で 2,000 kW 以上、ガス化・ガスエンジン発電の場合は同じく 50 kW 以上の規模にする必要がある。

(e) 事例

木質バイオマスを原料にした小型コージェネレーション設備の例を紹介する。この設備では工場から出る廃材を燃料として熱分解ガス化を行い、電力、温風、温水、冷水を工場に供給している。設備の概略フロー図を Fig. 4.1.1 に示す。発電出力は発電端で 175 kW、送電端で 157kW、熱出力は温風（67℃）は 174 kW（150 Mcal/h）、温水（80℃）は 116 kW（100 Mcal/h）、冷水（7℃）は 70 kW（60 Mcal/h）で、もともと排気ガス、冷却水として捨てられていた熱を有効利用することで、設備のエネルギー利用効率を高くすることができた。

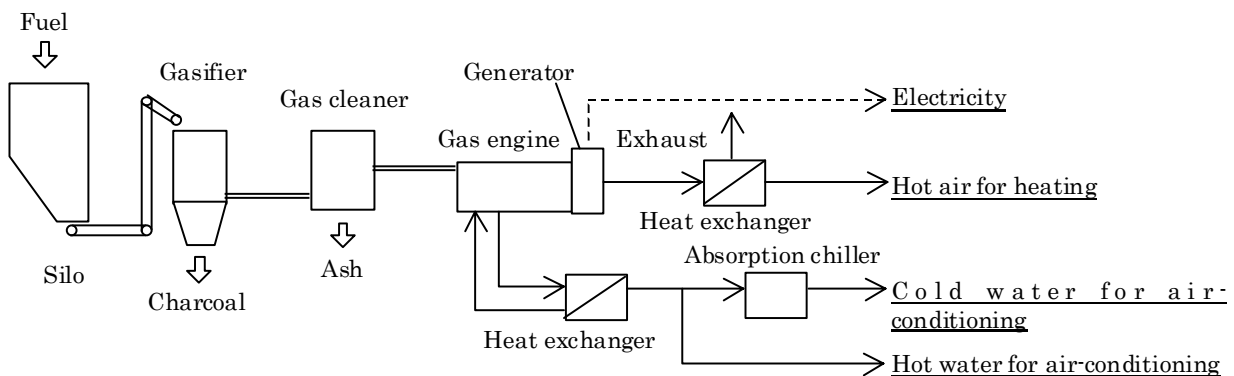


Fig. 4.1.1. Outline flow diagram of a small CHP using woody biomass.

4.1.3 混焼

(a) 混焼とは

バイオマスを火力発電所などで化石燃料と一緒に燃焼する技術を混焼という。既存の設備にバイオマス処理のためのわずかな変更を行うだけで、バイオマスを高効率な大規模燃焼設備で燃焼できる利点がある。ここでは、中国電力(株)、(株)日立製作所、バブコック日立(株)が共同で実施した石炭・木質バイオマス混焼技術の研究開発を紹介する。

(b) 事例－目標

木質バイオマスを石炭火力発電所で 5～10%程度混焼（以下混焼率は熱量ベース割合）し、安定運転の確保と環境規制値をクリアし、かつ発電効率の低下を最小限とすることを目指した。発電効率は既設石炭火力発電所並みの約 40%を目標とし、具体的には 5%混焼時に送電端効率の低下を 0.5%以内とした（10%混焼時、0.8%以内）。

(c) 事例－原料

マツ、スギ、ヒノキ、タケ等の性状分析から、石炭（瀝青炭）と比較して木質バイオマスは、揮発分が多く、燃料比（固定炭素と揮発分の比）が石炭の約 1/10 であり、灰分が少ない。小型のハンマーミル等により試験した結果、木質バイオマスの粉砕性は石炭と比較して重量当たりの粉砕動力原単位が 10 倍以上高いことや、石炭と木質バイオマスの同時粉砕試験により、木質の混合率を高めていくと石炭粉砕性が大きく低下することが分った。

(d) 事例－プロセスフロー

Fig. 4.1.2 はバイオマス前処理装置のフロー概略図である。木質バイオマスとしては、中国地方で調達したサイズ 50mm 以下、水分 50wt%の間伐材と竹材チップを乾燥に適した粒径まで破砕し（20mm 以下）、水分 20%以下となるまで乾燥させる。次に、型式の異なる 2 種類の粉砕機を組合せ、トップサイズが 1~5mm になるように調整して粉砕し、定量フィーダにて火炉に空気搬送する。混焼率は最大 15%とした。バーナは、石炭とバイオマスの同軸混焼バーナとバイオマス専焼（別置）バーナの 2 種類とした。

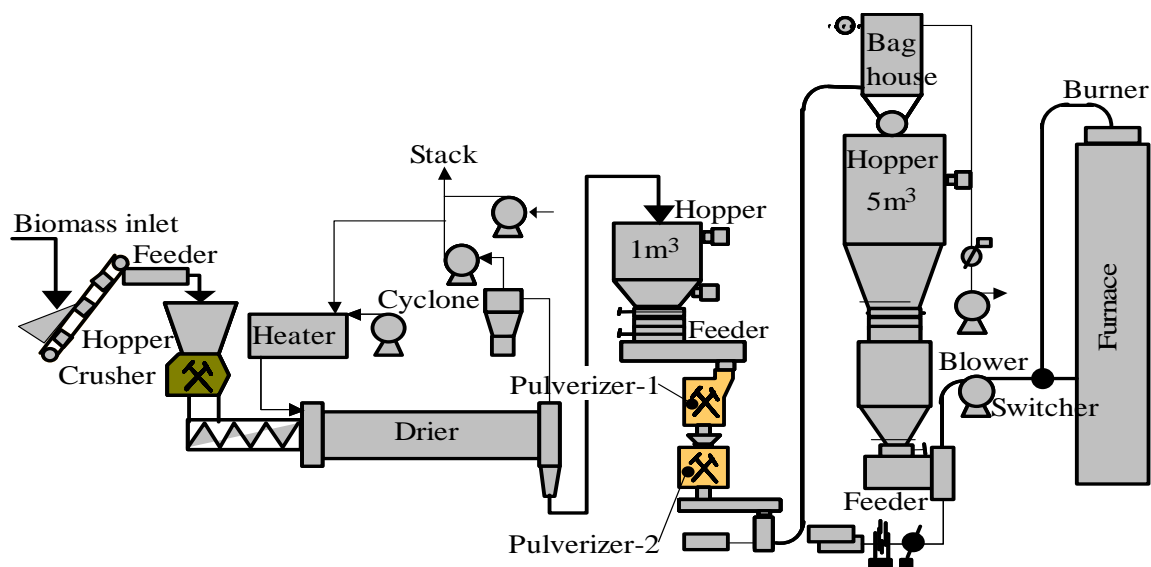


Fig. 4.1.2. Schematic of the Pretreatment Flow

(e) 事例－結果

Fig. 4.1.3 に試験結果の一部を示す。混焼率が増加するにつれ、同軸バーナ、別置バーナともに未燃分および NOx 相対値が低下した。未燃分の低下は揮発性の高いバイオマスを混入することにより、雰囲気温度が向上し、燃料自体の燃焼効率が向上したことを示している。この NOx の低下率は、燃料中の N 成分低減率からの予想値より、さらに低い値を示している。

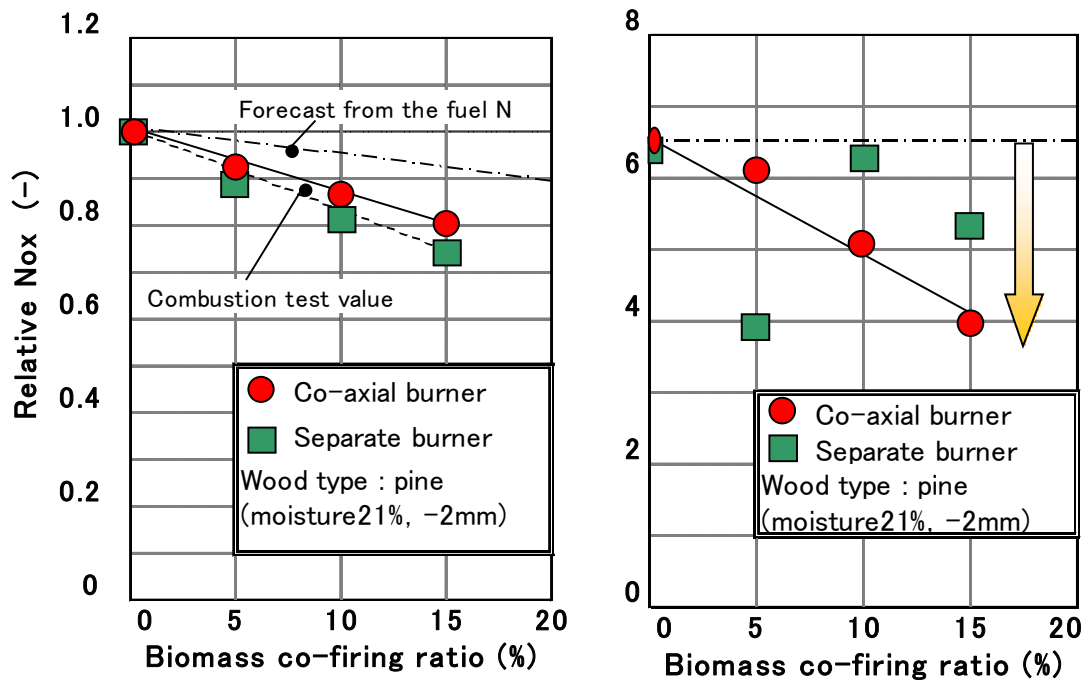


Fig. 4.1.3. Mixed Fuel Firing Test Results.

(f) 事例一効率

燃焼試験結果を基に、既設石炭火力発電所（75～500 MW の 3 容量機を選定）に適用する場合の基本的な設備、システム構成を検討し、発電効率および発電原価を評価した。混焼により発電効率に影響する要因は、ボイラ効率と所内動力の変化が考えられる。林地等の自然乾燥後、水分 30%、50mm 以下の間伐材チップを発電所に入力し、粉砕搬送工程を経て水分 20%、2 mm 以下の微粉バイオマスを用いて混焼した場合、石炭専焼時と比較して灰中未燃分は減るものの、木質バイオマスの水分によりボイラ効率は若干低下する。一方所内動力は、パイロット試験結果から二段階の衝撃粉砕機を用いた場合の粉砕動力の試算等から、全体の送電端効率低下は混焼率 5%および 10%において 0.44%と 0.77%となり、目標値の 0.5%以下および 0.8%以下を達成。さらに、木質バイオマス専焼発電（10 MW）と混焼発電原価を比較したところ、混焼発電原価は専焼発電原価（11.3 円/kWh）を下回ることから、混焼発電の優位性が確認できた。

4.2 ガス化

4.2.1 ガス化とは

バイオマス固体原料を高温場において、熱分解と化学反応によって、ガス燃料または化学原料ガス（合成ガスと呼ぶ）のガス状態に変換するプロセスをガス化または熱化学的ガス化と呼ぶ。

4.2.2 ガス化法の分類

ガス化法は Table 4.2.1 の条件因子の組合せで分類される。

Table 4.2.1 Classification of Gasification Method

Classification	Conditional factor
Gasification pressure	Normal pressure (0.1~0.12 MPa), High pressure (0.5~2.5 MPa)
Gasification temperature	Low temperature (700°C and below), High temperature (700°C and above), High temperature decomposition (ash fusion point and above)
Gasification agent	Air, oxygen, steam and combination of them, carbon dioxide for special case
Heating (Temperature zone formation)	Direct gasification (heat generation from reaction of partial gasification raw material and oxygen) Indirect gasification (heating raw material and gasification agent by external heat)
Gasifier types	Fixed bed, moving bed, circulating fluidized bed, entrained bed, mixing bed, rotary kiln, twin tower, molten furnace

4.2.3 ガス化に関するバイオマスの物性調査

ガス化の計画に先立って、バイオマスの物性を調査しておくことが必要である。

(a) 元素分析

バイオマスの炭素 (C)、水素 (H)、酸素 (O)、硫黄 (S)、窒素 (N)、塩素 (Cl) を元素分析 (HCN コーダー等利用) によって求める。硫黄 (S) と塩素 (Cl) 成分が多いと、プラント機材の腐食を起こす。炭素 (C)、水素 (H)、酸素 (O) のモル比を求め $C_nH_mO_p$ の略式分子式を求めておく。草本類、木本類のバイオマスでは $m=2$ に対し、 $n=1.2\sim 1.5$ 、 $p=0.8\sim 1.0$ である。

(b) 灰分組成と融点

灰の軟化点、融点、流動点を酸化雰囲気と還元雰囲気で計測する。融点温度が低い場合プラントのトラブルが起きやすい。

(c) 工業分析

原料バイオマスの工業分析を行い、表面水分、固有水分、揮発分、固定炭素分、灰分を求め、さらに高位および低位発熱量を求める。これらはガス化解析に重要な物性値である。

4.2.4 ガス化剤

固体バイオマスを可燃性ガスへ変換させるためには化学反応を起こさせるための物質が必要で、これをガス化剤と呼ぶ。ガス化剤に用いられる物質は空気 (N_2 、 O_2)、酸素 (O_2)、 H_2O 、 CO_2 が主なもので、必要に応じこれらを混合して用いる。空気 (うち O_2 のみ反応)、 O_2 の場合は酸化反応で発熱し、 O_2 使用量が増えると有効な可燃性ガスが減少する。

4.2.5 バイオマスのガス化に関する基本現象

バイオマス原料のガス化プロセスは基本的に次の段階を経てガス化に至る。

(a) 表面水分の蒸発

原料は水の沸点 $100^\circ C$ (圧力によって変わる) で表面水分が蒸発する。原料が大きい場合は内部に水分が残る。

(b) 固有水分の蒸発

表面水分の蒸発に続き、沸点 $100^\circ C$ より $10\sim 20^\circ C$ 高い温度で固有水分が蒸発する。

(c) 揮発分の気化

原料が $200\sim 300^\circ C$ になるとバイオマスの熱分解が始まり、 CO 、 CO_2 、 H_2 、 H_2O がガスとして気化する。このときの熱分解は発熱反応である (バイオマス $C_nH_mO_p$ 特有の現象)。

(d) 揮発分の気化とガス化反応

原料バイオマスは揮発分を気化させながら、温度を上昇させ、軽質の炭化水素 (C_xH_y : x, y は 1 以上の整数、 x が小さいと軽質、 x が大きいと重質) から、沸点の高い重質の C_xH_y へと揮発物質が移っていく。このあと C_xH_y はガス化剤と反応して低分子のクリーンガスに転換するが、ガス化剤の拡散が遅い場合には C_xH_y は縮合して、タール・すすの発生が起こる。

(e) チャーのガス化

原料バイオマスの揮発分の気化終了後、固定炭素と灰分はチャーとなって雰囲気温度まで昇温される。このあとガス化剤と反応し、炭素分は CO 、 CO_2 のガスに転換する。ただし、ガス化剤が水蒸気過剰の場合かつ雰囲気温度が $750^\circ C$ 以上の場合は水性ガス化反応 ($C + H_2O \rightarrow CO + H_2$) により、主に CO 、 CO_2 、 H_2 からなるガスが発生する。

(f) チャーの残分

水性ガス化反応は反応速度が遅く、チャーは残分となりやすい。タール・すす・チャーの発生は効率を下げ、機器のトラブルを起こしやすい。

4.2.6 ガス化生成ガスの特徴

ガス化は供給原料を一部燃焼させて加温する直接ガス化が一般に採用される。原料は木材チップやトウモロコシ茎などで、商業用に供されているガス化炉はほとんどが常圧・直接ガス化プロセスに属する。直接ガス化では反応温度の 800℃以上を保持するため、ガス化剤には必ず空気または酸素が必要となり、目的に応じて水蒸気が混入される。反応温度を維持するために、一般には完全燃焼に必要な酸素量の約 1/3 (酸素比と呼ぶ) が供給され、部分燃焼 (部分酸化と同意) によってガス化反応が行われる。生成ガスはガス中の可燃ガス (CO、H₂、C_xH_y) の含有割合によって発熱量が決まる。高位発熱量の値によって、低カロリーガス (4~12 MJ/m³)、中カロリーガス (12~28 MJ/m³)、高カロリーガス (28 MJ/m³以上) などの分け方がある。バイオマスの直接ガス化の場合、ほぼ低カロリーガスに属する。バイオマスとして稲わら、ガス化剤として水蒸気・酸素を用いたガス化生成ガス組成の基礎実験例を Fig. 4.2.1 に示す。なお、供給バイオマスの高位発熱量に対する生成ガス (常温) の高位発熱量の比を冷ガス効率と呼ぶ。

4.2.7 ガス化の装置と実施例

固定床ガス化炉の実施例を次に示す。固定床炉は固体燃料の燃焼またはガス化の基本となるもので、比較的シンプルな構造で装置コストも安い。ガス化炉の概念図を Fig. 4.2.2 に示す。原料は一般に大きさ 2.5~5 cm の木材チップが使われ、上部供給口より投入されて、炉内に積層される。ガス化剤 (空気、酸素、水蒸気またはこれらの混合ガス) は炉底より上昇流で供給される (ガス化方式には下降流の形式もある)。ガス化反応は下部から上部へ進む。下部より上部へ、灰層、チャー層、揮発・熱分解層、生材層の順に、原料のガス化に伴う変化によって各層を形成する。生成ガスが上部より取り出される。

参考文献

Kawamoto, H. in “Baiomasu, Enerugi, Kankyo”, Saka, S. Ed., IPC, 2001, pp.240-244 (in Japanese)

Sakai, M. in “Baiomasu, Enerugi, Kankyo”, Saka, S. Ed., IPC, 2001, pp.409-421 (in Japanese)

Takeno, K. in “Baiomasu Enerugi Riyono Saishin Gijutsu”, Yukawa, H. Ed. CMC, 2001, pp.59-78 (in Japanese)

Sakai, M. "Baiomasuga Hiraku 21 Seiki Enerugi", Morikita Shuppan (1998) (in Japanese)
 Yokoyama, S. "Baiomasu Enerugi Saizensen", Morikita Shuppan, 2001, pp.87-95 (in Japanese)

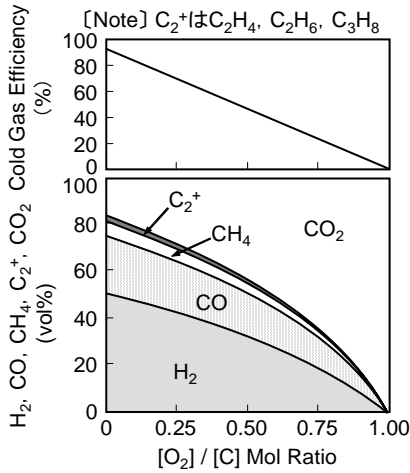


Fig. 4.2.1. Changes in product gas composition due to oxygen ratio.

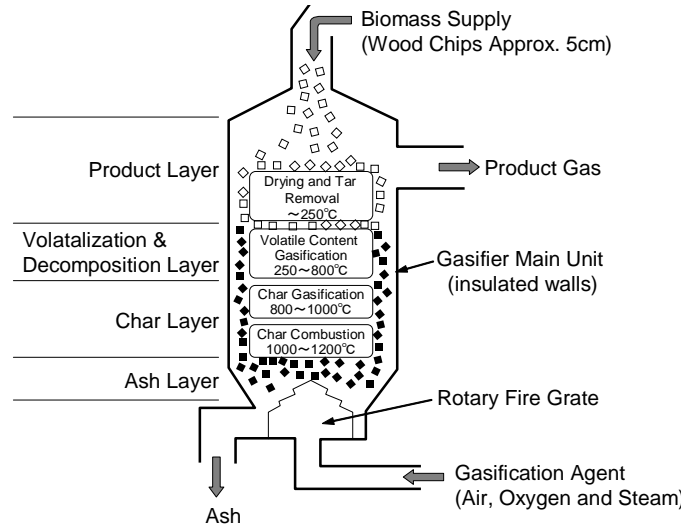
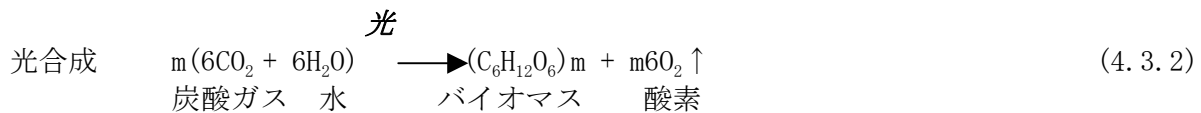
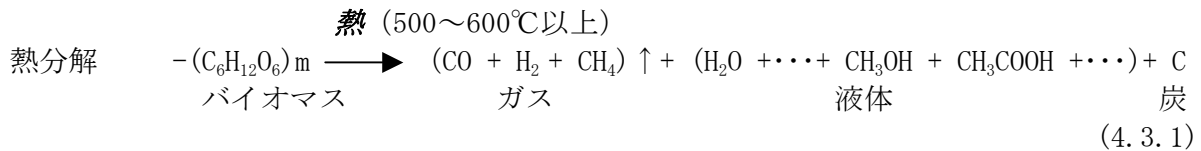


Fig. 4.2.2. Concept diagram of a fixed bed gasifier

4.3 熱分解

4.3.1 熱分解とは

バイオマスの構成元素は炭素、水素、酸素である。式(4.3.1), (4.3.2)でそれぞれバイオマスの光合成、熱分解を簡略的に表すことができる。Fig. 4.3.1に、バイオマスの熱分解の概要を示す。



バイオマスの主成分はセルロース、ヘミセルロース、リグニンであるが熱分解温度が高くなるにつれ分解物の量が多くなる。残渣は炭であり、概ねその収率は10%~25%である。

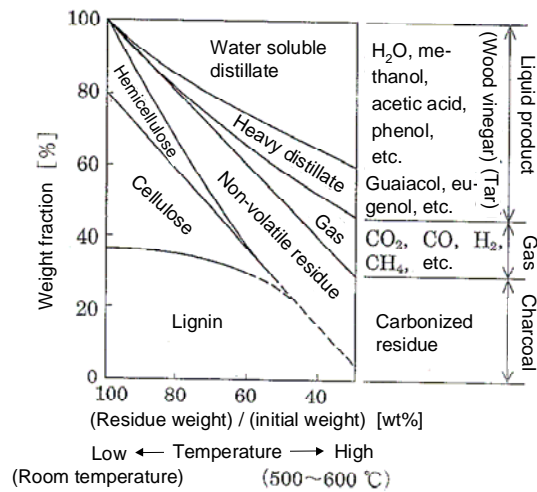


Fig. 4.3.1 Composition changing during pyrolysis.

4.3.2 熱分解・急速熱分解の特徴

海外の Dynamotive (カナダ) や BTG (オランダ) で開発された急速熱分解装置の液収率は、60～80%と高収率で注目を浴びている。急速熱分解では減圧熱分解と同様の効果がある。

バイオマスの熱分解過程では、先ず水分が蒸発(～110°C)、次いでヘミセルロースが約200～260°C、セルロースは240～340°C、リグニンは280～500°Cで分解する。大気圧で500°Cに達した段階ではほぼ熱分解は終わる。加熱速度を10°C/sと100°C/sで到達最高温度を600°Cに設定した場合を考えてみる。10°C/sでは1分後に、100°C/sでは6秒で設定温度になる。100°C/sの場合には木材の熱分解は5秒で終了し、反応系内は分解ガスの発生で圧力は急激に大きくなる。加熱速度が大きい程、揮発生成物の滞留時間は短くなる。木材の熱伝導率(300 K)は、繊維に垂直方向で0.12～0.42 W/(m K)であり純銅の約1/1000である。熱が非常に伝わり難いことから急速熱分解するには微粉砕が必要不可欠となる。また、部分燃焼法では空気を助燃ガスに用いるので多量のN₂を高温で排出する事となり、その熱損失量が大きくガスの熱量は低いものとなる。

4.3.3 急速熱分解装置

(a) 基礎実験装置

熱天秤は極微量(数mg～数十mg)の試料で熱変化を分析できる。生成物の評価は困難であるが、室温～任意の温度範囲での加熱速度の影響を重量変化で観察できる。

赤外線加熱炉を用いた熱分解装置では数 g ～数十 g の試料量で、任意の加熱速度、設定温度における各生成物の評価ができる。

溶融塩や熱砂浴による瞬間加熱装置は溶融塩の温度あるいは任意温度の加熱媒体中に試料を瞬時に浸漬する熱分解装置である。赤外線加熱炉と同様、基礎実験用であるが処理量を多くできるので生産物の評価や物質収支を求めることができる。溶融塩は塩の融点が設定温度となる。

(b) ベンチ規模実験装置、実用化装置

遠心力型熱分解装置の例として、米 NREL 式ボルテックス反応器では、木材チップをガス気流にのせ摩擦旋回方式で高温壁を滑走、移動させて熱分解している。旋回により常に新しい表面が露出することで熱分解反応はスムーズに進行する。BTG 式回転逆円錐反応器では、熱媒体に砂を用いて遠心力を利用する構造となっている。熱伝達面積が大きく熱回収やタール障害対策にノウハウがあると思われる。

流動炉式熱分解装置は流動床による反応器であり、Dynamotive-RTI、Pasquali-ENEL (イタリア)、Ensyn (カナダ)、RedArrow-Ensyn (米)、UnionFenosa-Waterloo (スペイン)、VTT (フィンランド) などがある。微細木粉を高温の不活性ガスあるいは熱媒体とともに、高温の反応部に瞬時に通過させて熱分解油の収率を高めている。バイオマスの流動層熱分解では、圧縮性のある粒子の定量供給が難しく、タールが反応器内や配管内に固化して閉塞する障害を起こしやすい欠点がある。

マイクロ波急速熱分解装置を用いるマイクロ波法は丸太や塊状物を急速熱分解できる (日本：産総研)。マイクロ波法ではバイオマスの内部から発熱が起こり、 $250^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 以上の加熱速度で急速熱分解した時と同様の結果となる。粒子より塊状物の方がエネルギー効率は良い。木材 (水分：10%) の場合、マイクロ波発振器への供給電力量は、約 1.4 MJ/kg (0.4 kWh/kg) で完全に熱分解できる。マイクロ波法では付着タールの固化や炭化を防ぐことができ、タールトラブルは少ない。

4.3.4 生成物の特徴

(a) 熱分解液

木質材原料の場合には油分は極く微量であり、1%に満たないことが多い。原料の含水分 (8～40%) と反応水 (原料の 14～17%) が液中に混ざり、水の多い有機溶液と親水性タールの混合物といえる。木タールの高位発熱量は $12.5\sim 21 \text{ MJ/kg}$ 、上層の有機水溶液は、水分が約 80% で $3.3\sim 4.2 \text{ MJ/kg-wet}$ 、40% では $9.6\sim 12.5$

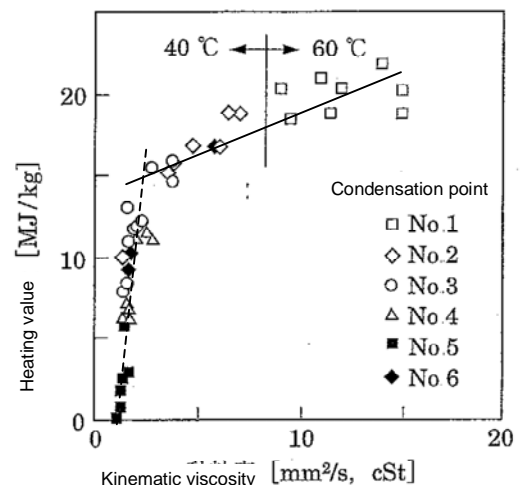


Fig. 4.3.2 The relationship between the viscosity and heating value of pyrolysis liquid.

MJ/kg-wet である。木タールと木酢液の粘度と発熱量との関係を Fig. 4.3.2 に示す。不安定で経時変化するため改質が必要である。

(b) ガス

ガスには CO₂ が多く含まれ、可燃ガスは CO、H₂、C₁~C₅ までの飽和・不飽和炭化水素が含まれる。

(c) 炭化物

炭化物の高位発熱量は、32 MJ/kg-dry 程度である。密度が小さく吸着剤や活性炭原料に適しているがほぼ全量熱分解システムで消費されることが多い。

4.3.5 技術の現状

熱分解液は水可溶分が多く自動車用の燃料油とは溶け合わない。バイオマスの急速熱分解では、タールに起因する多くの障害が避けられずその解決法は装置メーカー各社のノウハウとなっており公表されない点が多い。一般的にバイオマスの急速加熱と液の凝縮回収のため急冷が必要であることから熱損失の把握、生産物の適正評価など長所、短所の見極めが重要となる。

参考文献

Miura, M. in “Biomass Handbook”, Japan Institute of Energy Ed., Ohm-sha, 2002, pp.106-115 (in Japanese)

Miura, M.; Kaga, H.; Sakurai, A.; Takahashi, K., Rapid pyrolysis of wood block by microwave heating, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **71**, 187-199 (2004)

4.4 炭化

4.4.1 炭化とは

木材、樹皮、竹、もみ殻などの固体バイオマスを空気（酸素）の供給を遮断もしくは制限して 400~600℃に加熱し、主生成物として炭（固体）を得る技術であり、酢液+タール（液体）と可燃ガス成分を副生する。液体成分の回収、利用を目的とする乾留と区別する場合には製炭といい、両者を併せて炭化と称するが、通常炭化といえは製炭を指す。

4.4.2 炭化の特徴

燃焼と並ぶ最も古典的な固体バイオマスのエネルギー転換法である。固体生成物（炭）の発熱量増加を主眼とするが、油化（タール製造）とガス化の二つの側面を併せ持つ。油化法としては常圧熱分解（4.3章参照）に相当し、高圧（直接）液化法（4.6章）とともに実操業が検討されたが、得られるタール（油）が低収率（30%以下）、低品質（高粘度、高酸素量、低発熱量、低 pH など）のため、高収率油化法（急速熱分解、4.3章）の登場に伴い衰退した。一方、ガス生産法としては操作温度が低く、可燃分（CO, H₂）の発熱量の点でガス化（4.2章）には及ばない。発電などのガス利用においては、相当量のタール分を除去する必要がある。しかし、炭化プロセスは一般に装置が安価で運転操作が容易という利点があり、今日でも高発熱量固体の製造法として重要性である。有機炭素のかなりの割合を炭として安定固定化することから CO₂ 排出量抑制につながり、低質バイオマス（都市ゴミ、生ゴミ、下水スラッジ、家畜糞など）の実用的な減容化技術としても有用である。

4.4.3 炭化の反応

基本的には不活性ガス（窒素）中の常圧熱分解であり、木材では 200℃以下で大部分の水が蒸発した後 200～500℃で主要構成成分であるセルロース、ヘミセルロース、

リグニンの分解とそれらの分解生成物である液体成分の留出、CO₂、CO を主体とする気体成分の発生が起こり、重量が急激に減少する。この温度域では各木材成分が脱水、解重合して分子間、分子内の結合切断と再結合を繰り返し、その結果生じた低分子量フラグメントが液体、気体となり、縮重合により高分子化したフラグメントと非分解部分がチャー（炭）を形成する。500℃以上では小さな重量減少となり、700℃までに H₂ を発生しながら炭中の炭素の縮合多環芳香族構造が発達し、炭素割合が 80%近くに増加する。700℃以上では H₂ 発生量は減少するが、炭素割合は増加して多環芳香族化がさらに進む。Fig. 4.4.1 は炭化過程の模式図であり、生成物分

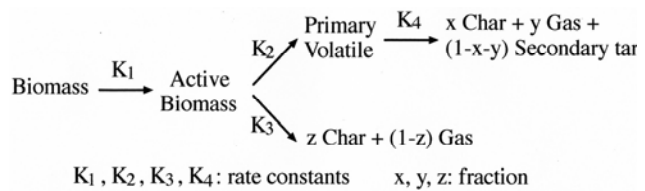


Fig. 4.4.1. Modified Broide-Shafizadeh scheme.

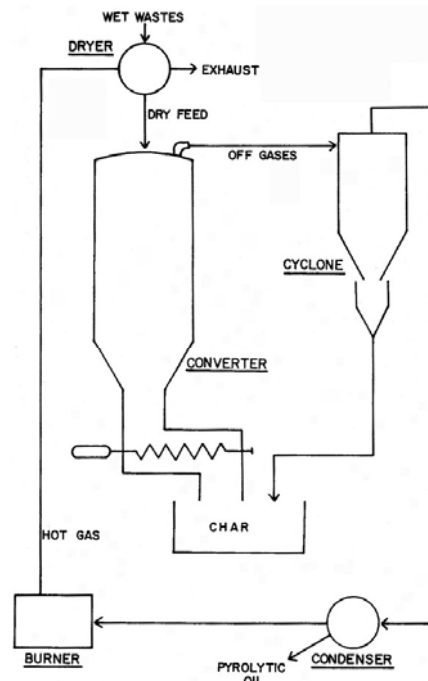


Fig. 4.4.2. Tech-Air pyrolysis system.

布が木材成分から生じた溶融物（メルト）の気体、液体、固体への分解（一次分解）と液体の二次分解の速度及び一次分解と二次分解の速度比によって決まることを表わしている。この分布は原料の種類や水分、大きさ、加熱速度、炭化温度などの影響を受け、特に後3者の影響は大きく、原料サイズが小さく加熱速度が大きいと液体（タール）収量が増加する。炭化温度が高いと収炭率が減少し、およそ500℃まではタール収量が増加する。操作圧力も重要な因子であり、低圧ほどタール生成は有利である。

4.4.4 炭化のエネルギー効率

Tech-Air 熱分解プロセス（Fig. 4.4.2）によるマツの樹皮とおが屑混合物の連続炭化を例として説明する。このプロセスは縦型固定床炉を用いる内熱式で、初期水分25～55%の原料を4～7%に乾燥して炉の上部から投入し、炉下部から送入した空気の一部を燃焼し、この熱により炭化を行う。生成した炭は炉底からスクリーンで抜き出し、生成蒸気はサイクロンで微粒炭素を除去した後コンデンサーを通し、ここでタール（油）を回収する。この後非凝縮ガスをバーナーで燃焼し、この燃焼排ガス（204～316℃）を原料の乾燥に利用する。炉内温度は430～760℃の間で可変であり、その温度は生成する熱分解ガスが原料の乾燥に必要な熱量をもつように設定される。Table 4.4.1 は炭、油、ガスの収率をそれぞれ最大化した操作におけるエネルギー分布とそのプロセス効率を正味の熱効率 Net Thermal Efficiency (NTE, %) = [(生成物の発熱量-プロセス熱 (乾燥用ガス) /原料の発熱量)] × 100 とエネルギー利益比 Energy Benefit Ratio (EBR, %) = [生成エネルギー量/消費エネルギー量] × 100 で表わしている。いずれの操作でも NTE と EBR には大差がなく、運転条件は炭と油の品質、用途、価格などにより決定される。

Table 4.4.1. Product energy yields and process efficiency.

Case	Feed [GJ]	Char [GJ]	Available Gas ¹⁾ [GJ]	Oil [GJ]	Dryer Gas [GJ]	NTE [%]	EBR [-]
Maximum char	9.18	4.54	1.72	0.63	1.85	75.0	3.71
Maximum oil	9.18	2.85	1.84	2.21	1.85	75.2	3.72
Maximum gas	9.18	3.48	2.16	1.26	1.85	75.1	3.72

¹⁾ (Total gas produced) - (Dryer gas)

4.4.5 炭化生成物

日本では、炭は暖房・調理用燃料、活性炭用の他吸着能を活かして土壌改良、飼料、床下調湿などとして広く利用されている（いわゆる新用途木炭）。液体生成物のうち低沸点の酢液は農業資材、消臭材などとして市販されているが、高沸点のタールは一部が医薬品（クレオソート）として実用されているに過ぎない。実験室レベルでは、フェノール樹脂接着剤の製造、木材防腐剤の回収、導電性炭素の製造などが提案されている。生成ガスの用途はプロセス補助燃料である。

4.4.6 技術の現状

運転操作などに大きな変更はないが、原料の多様化に伴い、規模や形状の異なる炭化炉が多数開発され、実用運転中である。実験室規模の 900°C ニッケル触媒炭化が、導電性と高分子液相吸着能を備えた機能性木炭と水素リッチガスの同時生産法として注目される。

参考文献

- Bridgwater, A. V.; Bridge, S. A.: “Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilization”, Bridgwater, A. V., Grassi G., Eds., Elsevier Applied Science, 1991, p. 22,
- Lede, J. Reaction temperature of solid particles undergoing an endothermal volatilization. Application to the fast pyrolysis of biomass, *Biomass Bioenergy*, **7**, 49-60 (1994)
- Pomeroy, C. F. “Biomass Conversion processes for Energy and Fuels”, Sofer, S. S., Zaborsky, O. R. Eds., pp. 201-211, Plenum (1981)
- Suzuki, T.; Miyamoto, M.; Luo, W.-M.; Yamada, T.; Yoshida, T. in “Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion”, Vol. 2, Bridgwater, A. V.; Boocock, D. G. B., Eds., CPL Press, 2006, pp. 1580-1591
- Suzuki, T.; Suzuki, K.; Takahashi, Y.; Okimoto, M.; Yamada, T.; Okazaki N.; Shimizu, Y.; Fujiwara, M. Nickel-catalyzed carbonization of wood for coproduction of functional carbon and fluid fuels I., *J. Wood Sci.*, **53**, 54-60 (2007)

4.5 水熱ガス化

4.5.1 水熱ガス化とは

水熱ガス化とはバイオマスを加圧熱水中で処理して可燃性のガスを得る技術で、通常 350°C 以上、20 MPa 以上の条件が用いられる。Fig. 4.5.1 に水の相図を示すが、気液平衡線が三重点から始まって臨界点で終了している。水熱条件は、この臨界点の周辺に位置する。温度も圧力がそれぞれ臨界温度、臨界圧力よりも高い場合には水熱条件は特に超臨界水と呼ばれ、超臨界水中のガス化は

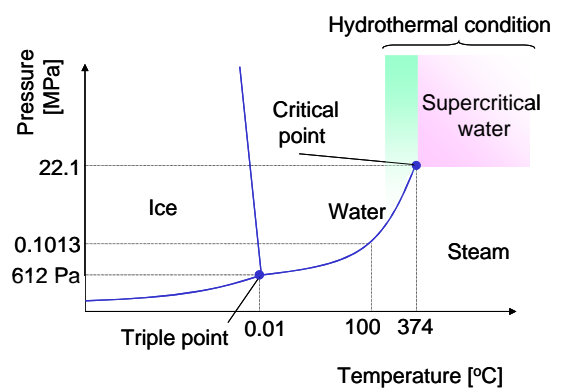


Fig. 4.5.1. Phase diagram of water.

「超臨界水ガス化」と呼ばれる。この加圧熱水は高い反応性を有し、バイオマスがこの水の中に置かれると、加水分解と熱分解によってガス化が進行する。

4.5.2 水熱ガス化の特徴

水熱ガス化は含水性のバイオマス処理に適した技術である。含水性のバイオマスをガス化しようとする時、その高い含水率のために、通常の熱化学的ガス化は利用できない。これに対して水熱ガス化は水を反応媒体として用いるために、含水性のバイオマスを経済的にもエネルギー的にも不可の大きい乾燥前処理を行うことなく利用することができる。これらの条件における水の反応性は高く、水熱ガス化は迅速かつほとんど完全なバイオマスのガス化を実現する。含水性バイオマスから可燃性のガスを得るためにはメタン発酵も用いられるが、通常反応が完結するのに数週間かかり、その上、未反応の発酵残渣（ざんさ）と排水処理が大きな問題となる。反応時間が数週間かかるため、反応器はかさ高くなる。発酵残渣はコンポストとすることができるが、利用するための十分な土地が得られなければ廃棄物として扱うしかない。水熱ガス化では、反応は長くても数分で完了し、適切な反応条件を設定すればほとんど完全なガス化が可能である。アルカリ、金属、炭素触媒などが反応促進に有効であることが知られている。

4.5.3 水熱ガス化の反応

水熱ガス化の反応場で進行する反応を確認するためには、容積数 mL の密閉型小型反応器やオートクレーブがしばしば用いられる。しかしながら、商用プラントの建設にあたっては Fig. 4.5.2 に示すような連続式反応器とすることが必要不可欠である。バイオマスは加圧して反応器に供給され、反応温度まで加熱される。その後、反応器内でバイオマスは水熱条件下でガス化され、反応器出口流れは室温まで冷却される。冷却時に放出される熱は熱交換器によって回収され、原料を加熱するのに利用される。室温まで冷却された後、出口流れは大気圧まで減圧され、生成ガスが回収される。連続式反応器が必要となるのは、水熱条件を実現するために必要な大量の熱のためである。この熱量は処理するバイオマスの発熱量に匹敵することがあり、熱交換器を用いた熱回収が必要不可欠となる。連続流通式反応器を用いなければ、この熱回収ができない。Fig. 4.5.2 には、理想的な場合の熱収支も示されている。バイオマスの発熱量は生成ガスに保持され、水熱条件を実現するために必要な熱量は完全に回収されて外部からの熱供給なしにガス化プロセスを運転することができる。実際には熱交換器の効率は 1 とはできず、急熱反応熱を供給する必要もあるために、反応器への一定の熱供給は必要となる。

4.5.4 水熱ガス化のエネルギー効率

Fig. 4.5.2 に示す理想的なプロセスでは、水熱ガス化のエネルギー効率は1となる。よく、水熱条件を実現するために大量の熱量が必要なため、水熱ガス化のエネルギー効率は低いという誤解が多く見られるため、このことはよく理解されたい。

熱交換が適切に行われれば、高いエネルギー効率を実現することは可能である。詳細なプロセス計算によって、プロセス運転動力および熱交換器の熱損失を考慮しても70%以上の効率が達成できることを確認した例もある。

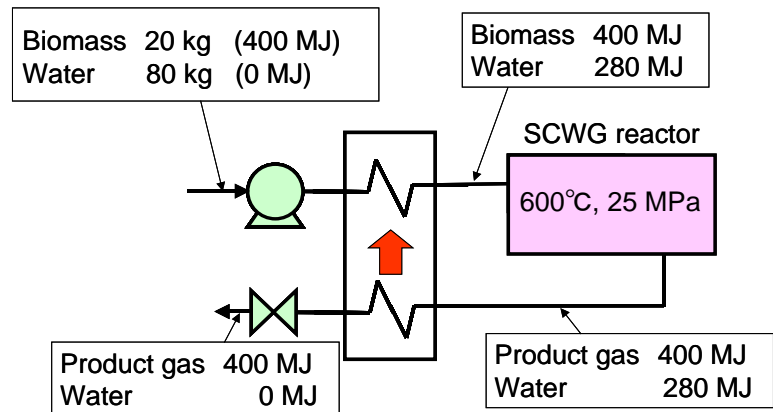


Fig. 4.5.2. Heat balance of hydrothermal gasification.

4.5.5 水熱ガス化の生成ガス

反応器出口流れを室温まで冷却すれば、生成ガスは自然に液相から分離される。タールを含まないガスを得ることができるが、これは通常の熱化学ガス化に対してもより優れた点である。生成ガスの主成分は水素、二酸化炭素およびメタンである。水性ガスシフト反応のために、一酸化炭素の収率はきわめて低い。高い反応温度、低い反応圧力、希薄な原料濃度ほど水素分率の高いガスが得られる。生成ガスの発熱量は反応条件によるが、通常、12~18 MJ/m³-N である。

4.5.6 技術の現状

研究室規模の反応器を用いた実験結果の報告は多い。パイロットプラントは3機が運転されている。一つは日本の中国電力のもの、もう一つはドイツの VERENA プラント、最後の一つは米国の TEES プロセスである。これらの処理量は1~2.4 t-wet/d である。多くの原料が試験されているが、いくつか挙げれば鶏糞、トウモロコシ発酵飼料、チーズ作成時の乳漿（にゅうしょう）などを用いた例が報告されている。現時点では主として高いプラントコストのために商用プラントは建設されていない。

参考文献

- Antal, M. J., Jr.; Allen, S. G.; Schulman, D.; Xu, X. D.; Divilio, R. J. Biomass gasification in supercritical water, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39, 4040-4053 (2000)
- Elliott, D.C.; Hart, T.R.; Neuenschwander, G.G. Chemical Processing in High-Pressure Aqueous Environments. 8. Improved Catalysts for Hydrothermal Gasification, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 45, 3776-3781 (2006)
- Kruse, A.; Henningsen, T.; Sinag, A.; Pfeiffer, J. Biomass gasification in supercritical water: Influence of the dry matter content and the formation of phenols, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 42, 3711-3717(2003)
- Matsumura, Y. Hydrothermal gasification, in “Biomass Handbook”, Japan Institute of Energy Ed., Ohm-sha, 2002, pp.125-130 (in Japanese)
- Matsumura, Y.; Minowa, T.; Potic, B.; Kersten, S. R. A.; Prins, W.; van Swaaij, W. P. M.; van de Beld, B.; Elliott, D. C.; Neuenschwander, G. G.; Kruse, A.; Antal, M. J. Jr. Biomass gasification in near- and super-critical water: Status and prospects, *Biomass Bioenergy*, 29, 269-292 (2005)
- Xu, X.; Matsumura, Y.; Stenberg, J.; Antal, M. J., Jr. Carbon-catalyzed gasification of organic feedstocks in supercritical water, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 35, 2522-2530(1996)
- Yu, D.; Aihara, M.; Antal, M.J., Jr. Hydrogen production by steam reforming glucose in supercritical water, *Energy Fuels*, 7, 574-577 (1993)

4.6 水熱液化

4.6.1 水熱液化とは

水熱液化とはバイオマスを高温高圧の熱水中（300°C、10MPa 程度）で反応させて熱分解させることである。気相での熱分解と同様に気体、液体、固体の三者が生成する。このうち液体については、軽質成分（気相での熱分解では木酢液と称される成分）は水に溶解し、重質成分（オイル：気相での熱分解ではタールと称される成分）は固体（炭、チャー）と混合した状態で得られる。すなわち、気体、水相、油相の三者が得られることになる。

4.6.2 水熱液化の特徴

水熱液化は水の中で反応が進行するため、原料の乾燥が不要であるという特徴がある。このため、含水率の高いバイオマス（水生バイオマスや生ごみ、汚泥など）の変換反応として適している。また、温度域により様々な反応が生じることから、様々な応用が可能である。Fig. 4.6.1 に水熱中で

起きる反応を示す。まず、100°C前後では、水溶性の成分が熱水に溶けることから抽出が可能である。150°C以上の温度になると、バイオマスを構成しているセルロースやヘミセルロース、タンパク質などの高分子の加水分解が起きてくる。200°C、1MPa 前後になると、固形状であったバイオマスが流動性を持つスラリーに変化する（流動化）。但し、この温度域ではオイル状の生成物はほとんどできない。さらに温度が高くなり 300°C、10MPa 前後になるとオイル状の生成物ができる液化が起きる。反応条件などにより主生成物を炭化物（チャー）とすることもでき、この場合は水熱炭化となる。また、超臨界点近傍で触媒を使うことでガス化することも可能である（4.5 章を参照）。

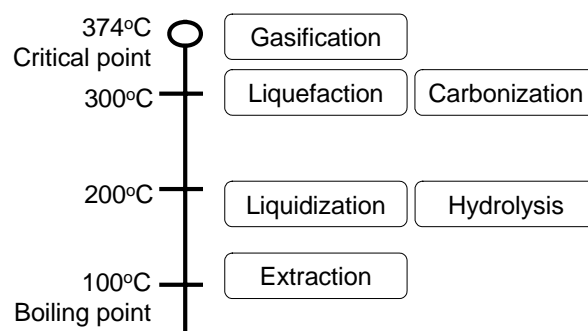


Fig. 4.6.1. Reactions which occur in the hot-compressed water.

4.6.3 水熱液化の反応

水熱液化は基本的に熱分解反応であるので、低分子となる分解反応と分解物が高分子になる重合反応とが複雑に起きながら反応が進行する。簡単な反応スキームを Fig. 4.6.2 に示す。図に示すように、バイオマスはいったん水溶性の生成物に分解されて、これが中間体となって重合・分解を繰り返しながら水に不溶なオイル状生成物となり、さらに重合が進んで炭状生成物となる。

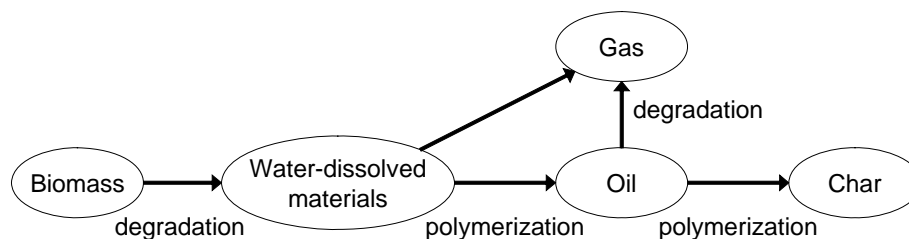


Fig. 4.6.2. Simple reaction scheme of liquefaction.

4.6.4 水熱液化の生成油

還元性ガス（水素や一酸化炭素）を用いず、水熱反応のみで得られる生成油の性質を Table 4.6.1 に示す。生成油には酸素が 20 wt%前後残っており、高位発熱量が石油系の重油（42 MJ/kg）に比べて低くなっている。木材からの生成油には、酸性成分が多く、腐食性や貯蔵時の重合による固化などの問題がある。また、粘性が非常に高い。一方、下水汚泥からの生成油では、タンパク質由来

の窒素が含まれている。燃焼利用時には NO_x 対策が必要になろう。化学成分としてはピリジン、ピラジン骨格の誘導体やアミド化合物が同定されている。選択的に分離できれば、化学原料としての利用の可能性もある。

Table 4.6.1. Properties of obtained oil by liquefaction.

Biomass	Wood	Sewage sludge
Elemental composition [wt%]		
Carbon	72	71
Hydrogen	6	9
Nitrogen	-	6
Oxygen	22	16
H/C	1.00	1.52
Higher heating value [MJ/kg]	29 - 30	33 - 34
Viscosity [mPa.s]	> 10 ⁶	10 ³ - 10 ⁴

4.6.5 水熱液化のエネルギー効率

エネルギー収率 (=オイルの有する熱量/原料の有する熱量) は 70%程度である。一方、プロセスのエネルギー効率に関しては、原料を室温から反応温度まで加熱するのに必要な熱量と、得られた生成油の有効熱量とがほぼバランスするか、若干余剰が出る。これは含水率に大きく影響され、含水率 85%前後以下でエネルギー生産型となると試算されている。

4.6.6 技術の現状

研究室規模からパイロット規模の研究開発が行われているが、実用機は建設されていない。パイロット規模では、1960~1970 年代に米国鉱山局の PERC プロセスや米国エネルギー省の LBL プロセスが、1990 年前後に日本の資源環境技術総合研究所・オルガノ株式会社の下水汚泥油化プラントが、2000 年前後にオランダのバイオフューエル社・シェル社の HTU プロセスなどが研究開発されている。

参考文献

- Appell, H. R., et al., Converting organic wastes to oil, *Bureau of Mines Report of Investigation*, 7560, (1971)
- Dote, Y., et al., Analysis of oil derived from liquefaction of sewage sludge, *Fuel*, **71**, 1071-1073 (1992)
- Ergun, S., Bench-scale studies of biomass liquefaction with prior hydrolysis, U.S. DOE Report LBL-12543 (1982)
- Goudriaan, F., et al., Thermal efficiency of the HTU-processes for biomass liquefaction, *Progress in Thermochemical Biomass Conversion*, 1312-1325 (2001)
- Ogi, T., et al., Characterization of oil produced by the direct liquefaction of Japanese oak in an aqueous 2-propanol solvent system, *Biomass & Bioenergy*, **7**, 193-199 (1994)
- Minowa, T., et al., Cellulose decomposition in hot-compressed water with alkali or nickel catalyst, *J. Supercritical Fluid*, **13**, 243-259 (1998)

Suzuki, A., et al., Oil production from sewage sludge by direct thermochemical liquefaction using a continuous reactor, *Gesuido Kyokaisi*, **27**, 104-112 (1990) (in Japanese)

4.7 バイオディーゼル製造

4.7.1 バイオディーゼルとは

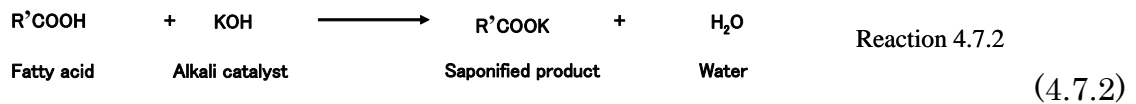
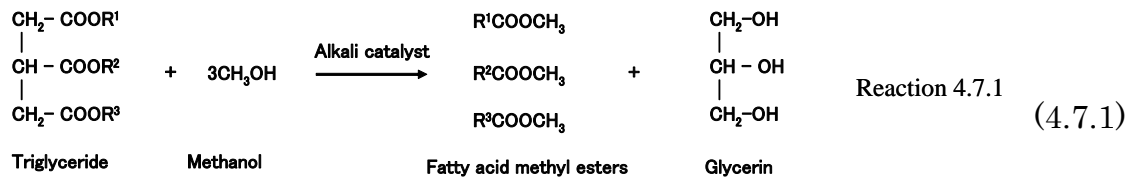
油脂類は他のバイオマス資源と比較して発熱量が高く、その多くは常温で液体である。これらの特徴は自動車燃料として望ましいが、動粘度 ($>30 \text{ mm}^2/\text{s}$ (40°C)) や引火点 ($>300^\circ\text{C}$) が高いためこのままでは利用できない。今、油脂類の主成分であるトリグリセリドをエステル交換反応により脂肪酸メチルエステルに変換することで、動粘度 $3\sim 5 \text{ mm}^2/\text{s}$ (40°C)、引火点 160°C 程度、セタン価 $50\sim 60$ の軽油代替燃料として利用することが可能となる。この脂肪酸メチルエステルをバイオディーゼル燃料 (BDF) と呼ぶ。

4.7.2 バイオディーゼル燃料の特徴

バイオディーゼル燃料は酸性雨の原因となる硫黄酸化物や黒煙が軽油に比べて少なく、浮遊粒子状物質 (PM; Particulate matter) の発生が少ないため、排気ガスは比較的クリーンである。さらにバイオマス資源由来であるため、地球上の炭素バランスを崩さないという利点がある。また、エステル組成として酸素を含むため軽油に比べ熱量が 11%程度少ないが、バイオディーゼル燃料の潤滑性能および黒煙発生の抑制効果など、ディーゼルエンジンのエネルギー変換効率を高める要素が働くことによって実走行上ほとんど軽油と差がない。

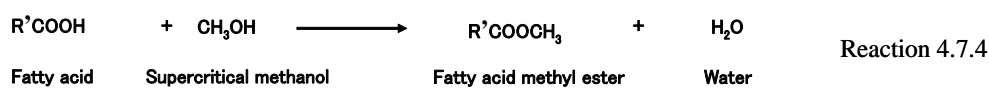
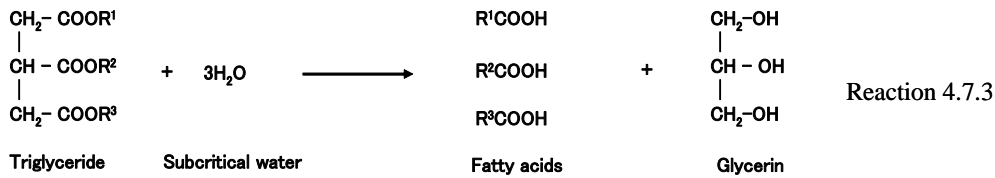
4.7.3 バイオディーゼル製造の反応

バイオディーゼル燃料の製造には植物油のエステル交換反応が用いられる (式(4.7.1))。植物油は脂肪酸とグリセリンのエステルであるトリグリセリドが主成分で、一部遊離の脂肪酸が含まれる。一般には、トリグリセリドをアルカリ触媒 (水酸化カリウム、水酸化ナトリウムなど) を用いてメタノールと混合し、 $60\sim 70^\circ\text{C}$ にて 1 時間攪拌して反応させれば、下層にグリセリン、上層にエステル層が得られる。この上層を水洗し、脱水・脱メタノールすれば脂肪酸メチルエステルが得られる。廃食用油などにはトリグリセリドの他に遊離脂肪酸が存在するため、アルカリ触媒と反応してアルカリ石ケンとなり(式(4.7.2))、収率が低下する。



R¹, R², R³, R'; Hydrocarbon residues

そこで、酸触媒により遊離脂肪酸をまず脂肪酸メチルエステルとし、次に去を後続させる方法や、イオン交換樹脂あるいはリパーゼ酵素、さらには超臨界メタノールと無触媒法でのエステル交換反応が提案されている。また、エステル化を効率よく進め、メタノールグリセリドを亜臨界水で加水分解して脂肪酸とし、これを超臨界メタノールにて無触媒法で脂肪酸メチルエステルに変換する二段階超臨界メタノールプロセス（式(4.7.3)、(4.7.4)および Fig. 4.7.1）が提案されている。遊離脂肪酸を多く含み、かつ水が共存する低品位の廃食用油などを高品位バイオディーゼルに変換できる唯一のプロセスとして注目されている。



R¹, R², R³, R'; Hydrocarbon residues

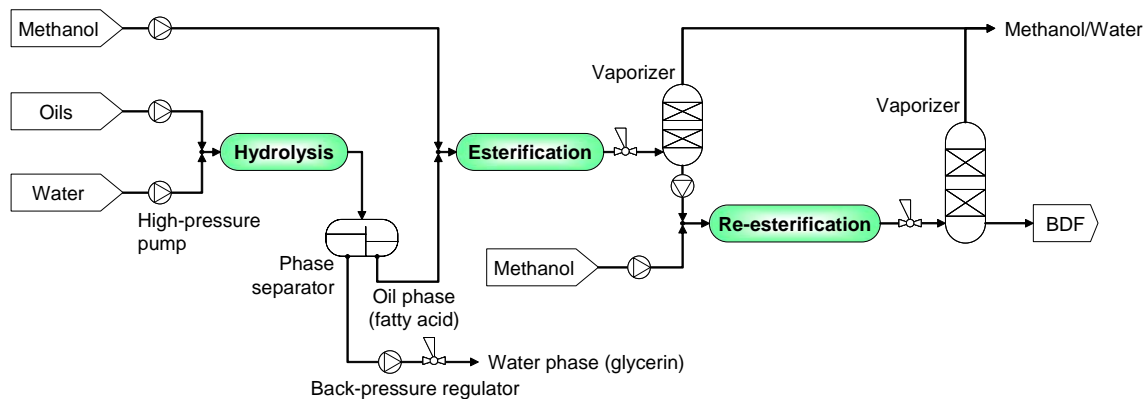


Fig. 4.7.1. Two-Step supercritical methanol process adopting the re-esterification step.

4.7.4 バイオディーゼル燃料のエネルギー効率

トリグリセリドのエステル交換反応と脂肪酸のエステル化反応はともに発熱反応であるが、発熱量は小さい。アルカリ触媒法では、反応温度 60～70℃に上げる顕熱エネルギーとメタノールの精留エネルギー、さらにプロセス全体の動力エネルギーが必要であるが、副産するグリセリンの処理にもエネルギーを必要とする。2.2 kg/s (7 万 t/年)規模のバイオディーゼル製造プラントでのエネルギー効率（高位発熱量基準）は約 62%と推定される。

4.7.5 技術の現状

EU を中心に商用プラントによるバイオディーゼルの製造が進められているが、その多くはアルカリ触媒法による。しかし低品位の廃食油に対しては、酸触媒法との組み合わせなど独自技術を開発しているようであるが、その詳細は明らかにされていない。我が国では油脂資源量に限りがあるため、今後は廃食油を使いこなせる新規技術プラントの参入が期待される。

参考文献

- Ban, K.; Kaieda, M.; Matsumoto, T.; Kondo, A.; Fukuda, H. Whole cell biocatalyst for biodiesel fuel production utilizing rhizopus oryzae cells immobilized within Biomass Support Particles, *Biochem. Eng. J.*, **8**, 39-43 (2001)
- Boocock D.G. Biodiesel fuel from waste fats and oils: A process for converting fatty acids and triglycerides, Proc of Kyoto Univ Int'l Sym on Post-Petrofuels in the 21st Century, Prospects in the Future of Biomass Energy, Montreal, Canada, 171-177 (2002)
- Kusdiana, D.; Saka, S. Two-step preparation for catalyst-free biodiesel fuel production; hydrolysis and methyl esterification, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **115**, 781-791 (2004)
- Mittelbach, M.; Remschmidt, C. Biodiesel, The comprehensive handbook, Boersedruck Ges. m.b.H, Vienna, Austria, 1-332 (2004)
- Saka, S. "All about Biodiesel", IPC Publisher, 2006, pp.1-461 (in Japanese)
- Sekiguchi, S. in "Biomass Handbook", Japan Institute of Energy Ed., Ohm-sha, 2002, pp.138-143 (in Japanese)

第5部 バイオマスの生物化学的変換

5.1 メタン発酵

5.1.1 メタン発酵とは

メタン発酵は嫌気性消化とも言われ、バイオマス（有機物）が酸素のない（嫌気性）条件で雑多な微生物の活動により分解し、最終的にメタンと二酸化炭素を生成する反応である。このバイオガスは $20\sim 25 \text{ MJ/m}^3\text{-N}$ ($5,000\sim 6,000 \text{ kcal/m}^3\text{-N}$) の低位発熱量を持つので、硫化水素を脱硫して燃料として使用することができる。メタン発酵は、生物系廃棄物や有機性廃水を対象としたエネルギー回収型処理技術として利用されている。また、発酵残渣は液肥やコンポストの原料となる。

5.1.2 メタン発酵の特徴

メタン発酵において、まず種々の嫌気性微生物により原料中の有機物が有機酸や水素に分解される。メタン発酵の最終段階では、嫌気性微生物の一種であるメタン生成微生物により、酢酸や水素等からメタンが生成する。メタン発酵は酸素のない嫌気条件で反応が進み、特にメタン生成反応は酸素があると阻害される。メタン発酵は生物の働きで進む反応のため、基本的には常温常圧で反応が進むという特徴がある。また、エタノール発酵とは異なり、メタン発酵は多種多様な微生物（複雑微生物系）の働きにより分解が進む事が最大の特徴である。

5.1.3 メタン発酵の原理

有機物と多種多様な嫌気性微生物が共存し、嫌気性、温度が $5\sim 70^\circ\text{C}$ 、pH が中性付近などの条件が満たされると自然に有機物の分解が進み、最終的にメタンと二酸化炭素が生成する。廃棄物の埋め立て地などではこれらの条件が満たされるので、特に人工的な制御を行わなくてもメタン発酵が進行してバイオガスが発生する。

メタン発酵は、嫌気性条件で反応が進み、大きく加水分解過程、酸生成過程、メタン生成過程に分けることが出来る。メタン発酵の概要を Fig. 5.1.1 に示す。特に固形状有機性廃棄物のメタン発酵初期段階では、セルロースなどの多糖類を単糖に、タンパク質をアミノ酸に、脂質を脂肪酸や

グリセリンなどのそれぞれの構成単位に加水分解する酵素を分泌する、加水分解細菌と呼ばれる微生物群が作用する。加水分解細菌としては、*Bacteroides* 属や *Clostridium* 属などが知られている。高分子化合物の加水分解で生成した単糖やアミノ酸は、酸生成細菌によってさらに発酵分解され、酢酸やプロピオン酸など低分子有機酸や水素にまで分解される。

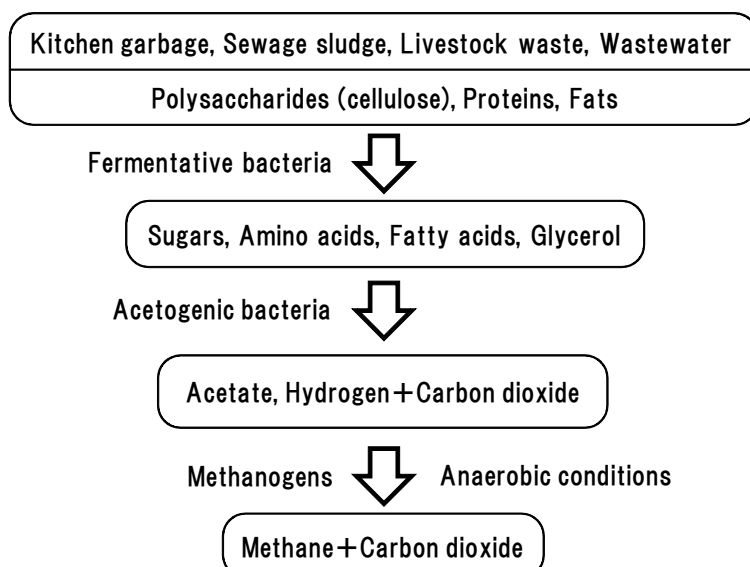
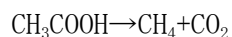
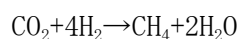


Fig. 5.1.1. Schematic diagram of biomethanation.

メタン発酵の最終段階では、酸発酵で生成した酢酸や水素を原料として、メタン生成微生物によりメタンと二酸化炭素が生成する。グルコースの酸発酵により、酢酸、乳酸、コハク酸、エタノール、ブタノール、アセトンなどが生成する。有機性廃水のメタン発酵では、生成するメタンの70%程度は酢酸から生成し、残りの大部分は二酸化炭素が水素により還元されて生成すると考えられている。酢酸からのメタン生成は次式で表される。



また、水素と二酸化炭素からのメタン生成は次式で表される。



メタン生成微生物は、酢酸等の特定基質をエネルギー源且つ炭素源として生育しメタンを生成する嫌気性微生物の総称で、*Methanobacter* 属や *Methanosaeta* 属などが知られている。分子生物学

的な解析により、メタン生成微生物は真性細菌や真核生物とは異なる古細菌 (*Archea*) という第三の生物群に分類されている。メタン生成微生物が利用可能な基質は非常に限られており、現在知られているのは水素、ギ酸、酢酸、2-プロパノール、2-ブタノール、メチルアミン類、メタノール、メチルメルカプタンなどである。

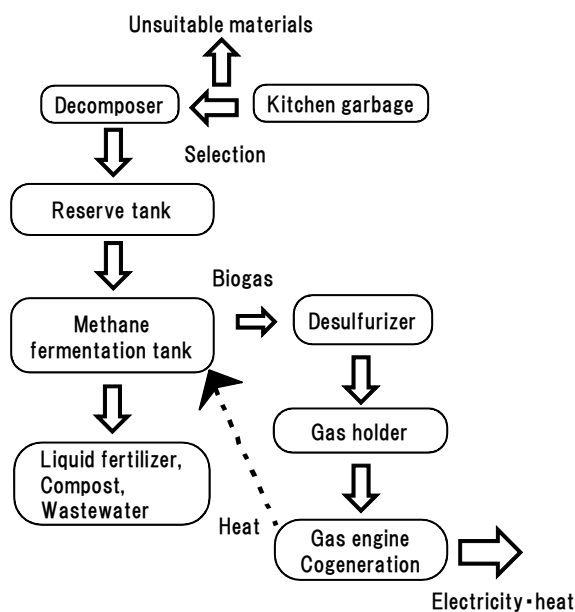


Fig. 5.1.2. Biomethanation flow of kitchen garbage.

5.1.4 メタン発酵の現状

食品廃棄物、畜産廃棄物、廃水処理汚泥、有機性廃水やし尿などについて、メタン発酵プラントが実用化されている。ヨーロッパが先行していたが、徐々に日本でも適用例が増えている。メタン発酵は、発酵温度により高温 (55℃)・中温 (35℃)・低温に分けられ、原料中の有機物濃度により大きく湿式と乾式に分けられる。中温よりも高温発酵の方がより有機物分解速度が速く、新しいメタン発酵システムでは高温発酵が用いられるようになってきた。また、短所としては、好氣的な処理に比べ有機物分解率が低いこと、窒素化合物やリン酸の除去率が低いこと、処理時間が長いこと、発酵温度に保つために加温が必要になることなどが挙げられる。発酵液や残渣を処理すると経済性が悪くなるので、農地還元できるシステムの構築が望ましい。これらの技術課題の解決を目指した研究開発が進められている。

参考文献

Ahring, B. K., "Biomethanation I", Springer, (2003)

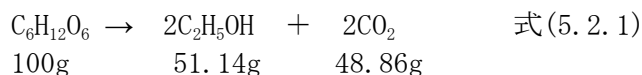
Nagai, S.; Ueki, K., “Anaerobic microbiology”, Youkenndou, (1993) (in Japanese)

Speece, R. E., “Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters”, Archae Pr, (1996)

5.2 エタノール発酵

5.2.1 エタノール発酵とは

エタノール発酵においては、グルコースやフルクトースなどの糖質が酵母などの微生物によって、分子状酸素のない嫌気的条件下で解糖系（エンムデン・マイヤーホフ経路）により分解され、(5.2.1)式のようにエタノールと二酸化炭素を生成し、この反応によって1分子のグルコースから2分子のATP（アデノシン三リン酸）が生成し、酵母は生育のためのエネルギーを獲得する。



エタノール発酵は人類の歴史とともに古くから、すなわち数千年前から、酒類、醸造食品の発酵に関連して、古くから知られ利用されてきた。中世には蒸留酒も作られるようになった。20世紀に入ってから発酵蒸留技術も進歩し、エタノールは酒類以外にも各種化学工業、飲食品工業、医薬、燃料などの分野で広く使われるようになった。特に、1970年代の2度にわたる石油危機以後は、化石燃料代替と地球温暖化防止を目的として、サトウキビ（ブラジル）やコーン（米国）などから大量に燃料用エタノールが製造されるようになった。さらに、今後は、未利用で大量に存在し、食糧と拮抗しないセルロース系資源からのエタノール製造を目指して各国で技術開発が進められている。

エタノール発酵は生物反応であるため、常温常圧での反応である。工業的に広く用いられているエタノール発酵微生物はもっぱら *Saccharomyces cerevisiae* と呼ばれる酵母で、エタノール発酵能が強く、エタノール耐性も強い。酵母は(1)式により100gの糖質から51.14gのエタノールを生成し、重量は約半分となるが、糖質の保有するエネルギー2.872 MJ/molの約91%はエタノールに保存されるので、エタノール発酵は液体燃料への転換方法として優れた方法である。酵母は1883年にビールから純粋分離され、エタノール発酵の代謝経路について多くの研究がなされた。発酵できる糖の種類はグルコース、フルクトース、ガラクトース、マンノース、スクロース（シュクロース）、マルトース、などのヘキソースの単糖類、二糖類で、キシロースなどのペントースは発酵で

きない。*Pichia stipitis* や *Pachysolen tannophilus* のようにペントース発酵性を有する酵母も知られているが、エタノール耐性は弱い。そこで、*S. cerevisiae* にペントース発酵性を付与するための育種研究が世界中で活発に行われている。

酵母に次いでエタノール発酵能の強い微生物は *Zymomonas mobilis* という細菌で、発酵できる糖類はグルコース、フルクトース、スクロース（シュクロース）などである。発酵収率、発酵速度ともに酵母より優れているとされるが、エタノール耐性は酵母よりやや弱い。1980年代に国内で分離された *Zymobacter palmae* も *Z. mobilis* とほぼ同程度のエタノール発酵能を有するが、ゲノムの塩基配列が日本で決定され、両菌ともキシロース発酵性の付与など育種改良が進みつつある。

エタノール発酵能を付与した大腸菌や *Corynebacterium* 属細菌の実用化研究も行われつつある。特に前者は最近、小規模ではあるが工業的なバイオエタノール製造に使われ始めた。エタノールを生成する細菌には他に、*Lactobacillus* 属のヘテロ乳酸発酵菌、セルロース分解能を持つ *Clostridium* 属細菌、*Thermoanaerobium* 属などの嫌気性好熱菌が知られているが、生成エタノール濃度が低く、有機酸などの副産物も生成する点が実用化の上で課題となる。

5.2.2 糖質原料のエタノール発酵

糖質原料として大量に使用されているのは、ケーンジュース（砂糖キビの搾汁）やビート（甜菜）搾汁、またそれらから砂糖を製造した後の母液を濃縮した糖蜜などであるが、主成分はグルコース、フルクトース、スクロース（シュクロース）などである。これらの糖質原料は酵母や *Zymomonas* によって容易に発酵される。ケーンジュースをエタノール原料として大量に用いているのはブラジル、インドなどである。

ブラジルにおける発酵原料は糖分 11～17%のケーンジュース（砂糖キビの搾汁）、または、ケーンジュースを煮詰めて砂糖を結晶化させたあとの母液をさらに濃縮して糖分約 50%にしたもの（糖蜜）である。これらの原料は、ビート（甜菜）搾汁、ビート糖蜜の場合も同じであるが、グルコース、フルクトース、スクロース（シュクロース）などが主成分で糖質原料と呼ばれる。ケーンジュースは単独で、または糖蜜と混合して、サッカロミセス・セレビスシェ *Saccharomyces cerevisiae* と呼ばれる酵母ーパン酵母を用いることが多いーにより発酵タンクを用いてエタノール発酵する。発酵プロセスとしては Melle-Boinot 法と呼ばれる方法が広く用いられる。この方法においては発酵終了時に酵母菌体は遠心分離によって回収され、希硫酸（pH3）で雑菌を殺菌処理したあと繰り返し使用される。高い酵母濃度で発酵するので、ケーンジュースであれば約 15 h という短時間でエタノール濃度 7～8%のもろみを得られる。糖蜜の場合は糖濃度 20%前後に希釈して発酵する。

糖分濃度 55%の糖蜜を用いる場合、発酵歩合 82%（全糖に対して）、蒸留歩合 99%と仮定して、含水エタノール 1 m³ (kL)を製造するのに必要な糖蜜の量（原単位）は 3.3 t-wet である。

特殊な原料として乳糖と果汁蜜がある。ニュージーランドでは酪農業から多量に副生するミルクホエー（約 4%の乳糖を含む）を、廃水の BOD 低下と付加価値物質回収のために、エタノール発酵の原料として用いている。ミカンから果汁を搾り取った後の果皮などから約 8%の糖分と苦味を含む果汁をさらに搾り取り、これを糖分 40%以上に濃縮し、この過程で発酵阻害成分であるテルペンなどを除去したものが果汁蜜で、エタノール発酵の原料として用いる。

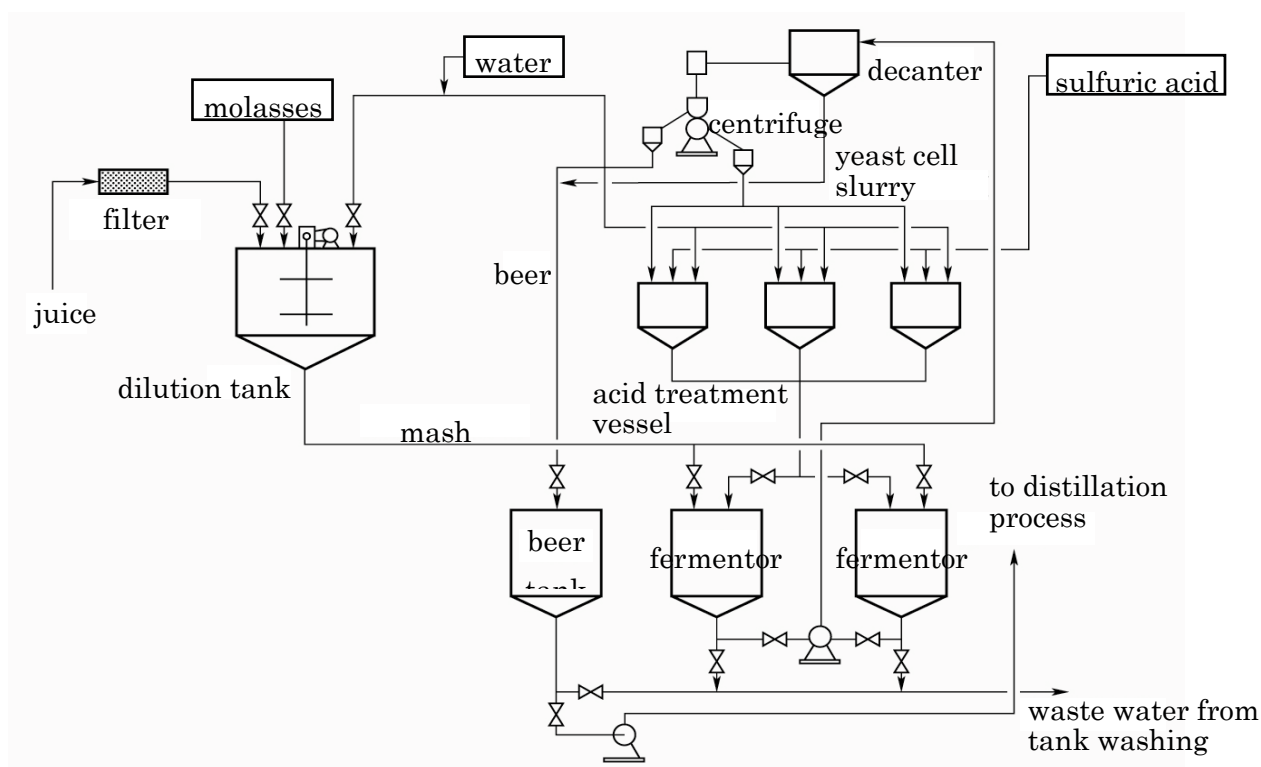
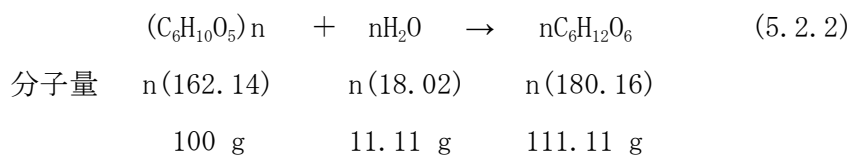


Fig. 5.2.1. Ethanol Fermentation by Melle-Boinot Process.

5.2.3 デンプン質原料のエタノール発酵

デンプン質は先ずアミラーゼによって糖化されグルコースとなる（式 5.2.2）



グルコースの主に α -1,4 結合ポリマーであるデンプン質の場合は、約 100°Cでの蒸煮、液化アミラーゼと糖化アミラーゼによる糖化工程（グルコースへの変換）を経て、エタノール発酵を行う。コーン（トウモロコシ）デンプンから大量にエタノールを製造しているのは米国であり、中国では甘しょ（甘藷、さつまいも）を大量に用いている。

生甘しょ（甘藷）を発酵原料とする場合、1990年代まで国内で行われていた低温蒸煮法について述べる。生甘しょはハンマークラッシャーで割砕し、80~90°Cで60分蒸煮する。全糖分15%となるようにもろみを調整して α -アミラーゼを添加し、58°Cまで冷却した後グルコアミラーゼを加えて、約2hでデンプンを液化、糖化する。次に、34°Cに冷却して酵母を接種し、30~33°Cで4日間発酵させると約8 vol%のエタノールを含む熟成もろみが得られる。生甘しょのデンプン価を24.3%（グルコース含量で27%）、発酵歩合92%と仮定すると、含水エタノール1 m³ (kL)を製造するのに必要な生甘しょの原単位は約6.03 t-wetとなる。

アメリカでは燃料エタノールの原料の多くはコーンのデンプンである。コーンは多くの場合、湿式ミル方式でまず亜硫酸液に浸漬し、次いでデンプン質、胚芽、グルテン、繊維質などの成分に分ける。デンプン質は加熱蒸煮後、液化アミラーゼと糖化アミラーゼの作用によりグルコースにまで分解され、酵母によって発酵される。酵母を遠心分離でリサイクルし、数個の発酵タンクを直列に連結して連続発酵するプロセスが多く用いられているが、回分発酵プロセスを採用している場合もある。最終発酵もろみのエタノール濃度は8~11%である。Fig. 5.2.2にコーンからのエタノール製造フローを示す。

デンプン価63%（グルコース換算で70%）、発酵歩合90%、蒸留歩合98.5%とすると、95 vol%エタノール1 m³ (kL)を製造するのに必要なコーンの原単位は2.4 t-wetである。

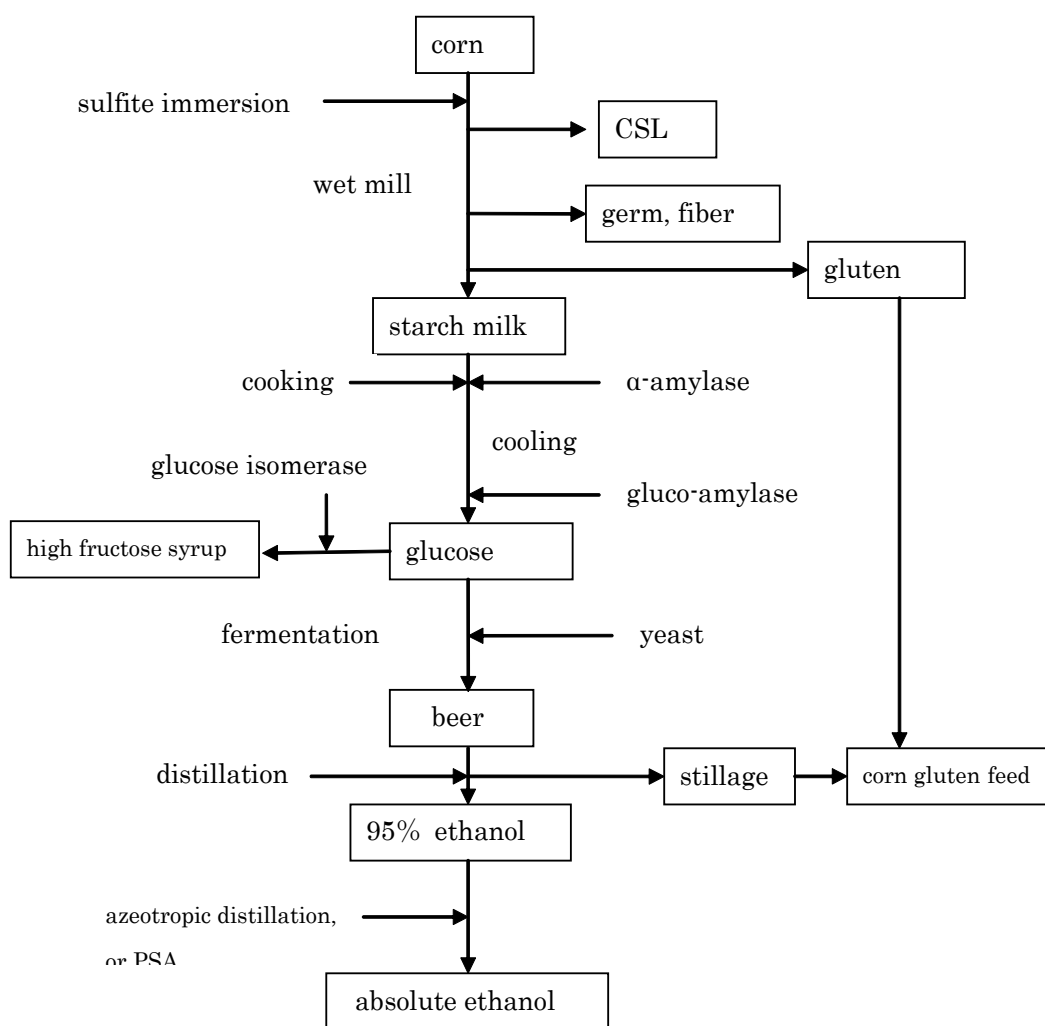


Fig. 5.2.2. Production process of ethanol and high fructose syrup from corn. (Modified from (Elander, 1996))

5.2.4 リグノセルロースのエタノール発酵

リグノセルロース系バイオマスは一般に、セルロース、ヘミセルロース、リグニンの主要成分からなっている (Table 5.2.1)。

Table 5.2.1. Compositions of Various Biomass (%).

	cellulose	hemicellulose	lignin
Soft wood	43	28	29
Hard wood	43	35	22
Rice straw	38	25	12
Office paper	69	2	11

これら3成分を酸やアルカリなど各種前処理法によって、あるいはセルラーゼによる糖化を組み

合わせて糖液を調整し、酵母などによってエタノール発酵を行う。

(a) 濃硫酸法

米国の Arkenol 社の技術をもとに NEDO プロジェクトにおいてさらに改良開発された方法である。粗粉碎されたバイオマス原料（水分約 15%）に 75%濃硫酸を噴霧し混練することによりセルロースは非結晶化する。次に加水して硫酸濃度を 20~30%で 10~15 min 処理して糖化する。固液分離後、糖と酸をイオン交換クロマトで分離し、硫酸は濃縮再利用、糖液はキシロース発酵能を有する育種酵母などでエタノール発酵する。

(b) 希硫酸法

粉碎したバイオマスを 0.5~1.0%希硫酸、150~180℃、約 1 MPa（10 気圧）で一次加水分解すると、主にヘミセルロースが分解され、キシロース等ペントースを主成分とし、各種ヘキソースを含む糖液が得られる。残った固形分（セルロース+リグニン）を同濃度の希硫酸、230~250℃、3~5 MPa（30~50 気圧）で二次加水分解すると、セルロースはグルコースに分解される。一次分解での糖収率は 90%以上になるが、二次分解では過分解などにより収率は 50~60%が限界とされる。2007 年に運転を開始したバイオエタノール・ジャパン関西（1,400 kl/年、大阪府堺市）のプラントでは、ヘミセルロース区分のみを遺伝子組換え大腸菌を用いてエタノールに転換している。米国 NREL（再生エネルギー研究所）は希硫酸による二次分解の代わりに、強力なセルラーゼにより高い糖収率を得られるプロセスの確立を目指して、セルラーゼの育種改良に力を入れている。2013 年以降の工業化を目標にしている。

参考文献

- 9th *Alcohol Handbook*, Japan Alcohol Association Ed., Gihodo Shuppan Co. Ltd, 1997
- Elander, R. T.; Putsche, V/ L/, in *Handbook on Bioethanol*, Wyman, C. E. Ed., Taylor & Francis Pub. 1996, pp329-350
- Saiki, T. in *Biomass Handbook*, Japan Institute of Energy Ed., Ohm-sha, 2002, pp157-165, (in Japanese)
- Saiki, T.; Karaki, I.; Roy, K., in *CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Vol. V, Energy and Biomass Engineering*, Kitani, O. Ed., American Society of Agricultural Engineers, 1999, pp139-164
- Saiki, T., in *Bioethanol Production Technology*, Japan Alcohol Association Ed., Kogyochosakai 2007, pp75-101. (in Japanese)
- Yamada, T., in *Bioethanol Production Technology*, Japan Alcohol Association Ed., Kogyochosakai 2007, pp102-126. (in Japanese)

5.3 アセトン・ブタノール発酵

5.3.1 アセトン・ブタノール発酵とは

偏性嫌気性細菌 *Clostridium* 属菌を用いて、糖からアセトン、ブタノールを培養液中に生産させる発酵である。このとき、若干のエタノールを生成する。それゆえ、ABE 発酵とも呼ばれる。*Clostridium* は、土壤に広く生息している細菌で、アミラーゼ、キシラナーゼ、プロテアーゼ、リパーゼなどを生産し、菌体外に分泌する。デンプンからブタノールを生産するワイツマン型、スクロースからブタノールを生産するサッカロ型の二つに大きく分類される。

5.3.2 アセトン・ブタノール発酵の特徴

アセトン・ブタノール発酵の歴史は古く、すでに工業化された技術である。第一次世界大戦時に、無煙火薬原料としてのアセトンの需要、そして塗料用材として、また第二次世界大戦時には戦闘機用の高オクタン価燃料としてのブタノールの需要が起き、アセトン・ブタノール発酵が研究、工業化された。しかし、軍需用途がなくなり、また石油化学の発展とともにアセトン・ブタノール発酵は廃れた。そして、近年バイオ燃料として再びブタノールに注目が集まっている。

5.3.3 アセトン・ブタノール発酵の反応

工業生産に用いられた菌には、主にアセトンとブタノールを生産するアセトン・ブタノール発酵菌とアセトンに代わってアセトンが還元されたイソプロパノールとブタノールを主生産物とするブタノール・イソプロパノール生産菌がある。反応経路は Fig. 5.3.1 のようになる。糖から解糖系を經由してピルビン酸、アセチル CoA、アセトアセチル CoA となり、エタノール、アセトン、ブタノール、イソプロパノールが生成される。実験結果に基づいたアセトン・ブタノール発酵の化学量論式は以下のように表される。



アセトン・ブタノール発酵では、ブタノールの蓄積が増加し、濃度が 3 kg/m^3 (g/L) を超えると生産物阻害が起これ、発酵が抑制される。最終的なブタノール濃度は約 30 kg/m^3 (g/L) 程度である。培養後、培養液を蒸留器に供し、アセトン (BP 56.3°C)、エタノール (BP 78.3°C)、ブタノール (BP

117°C) に分ける。

5.3.4 アセトン・ブタノール発酵の効率

アセトン・ブタノール発酵の反応式より、95 mol のグルコース（高位発熱量 283 MJ）から 60 mol ブタノール（170 MJ）、30 mol アセトン（54 MJ）、10 mol エタノール（14 MJ）、120 mol 水素（34 MJ）が生じる。したがって、アセトン・ブタノール発酵のエネルギー効率は 100% となり、グルコースの有するエネルギーがほぼ全量、ブタノール、アセトン、エタノール、水素に移ることとなる。

5.3.5 生成物の利用

アセトン・ブタノール発酵は、無煙火薬の原料であるアセトン、ならびに戦闘機燃料としてのブタノールを生産するために工業化された。現在はアセトン、ブタノールともに石油から製造されているが、近年のバイオ燃料への期待とともに再び再生可能資源からのブタノール生産が注目されている。ブタノールはガソリン燃料、ディーゼル燃料の双方へ添加可能であり、エタノールよりもブタノールの方がガソリンへの親和性が高い。

参考文献

- Crabbe, E.; N-Hipolito, C.; Kobayashi, G.; Sonomoto, K.; Ishizaki, A., Biodiesel production from crude palm oil and evaluation of butanal extraction and fuel properties, *Process Biochim.*, **37**, 65-71 (2001)
- Ishizaki, A.; Michiwaki S.; Crabbe, E.; Kobayashi, G.; Sonomoto, K.; Yoshino, S., Extractive acetone-butanol-ethanol fermentation using methylated crude palm oil as extractant in batch culture of *Clostridium saccharoperbutyl acetonicum* N1-4 (ATCC13564), *J. Biosci. Bioeng.*, **87**, 352-356 (1999)
- Lee, T. M.; Ishizaki, A.; Yoshino, S.; Furukawa, K., Production of acetone, butanol and ethanol from palm oil waste by N1-4, *Biotechnol. Letters*, **17**, 649-654(1995)

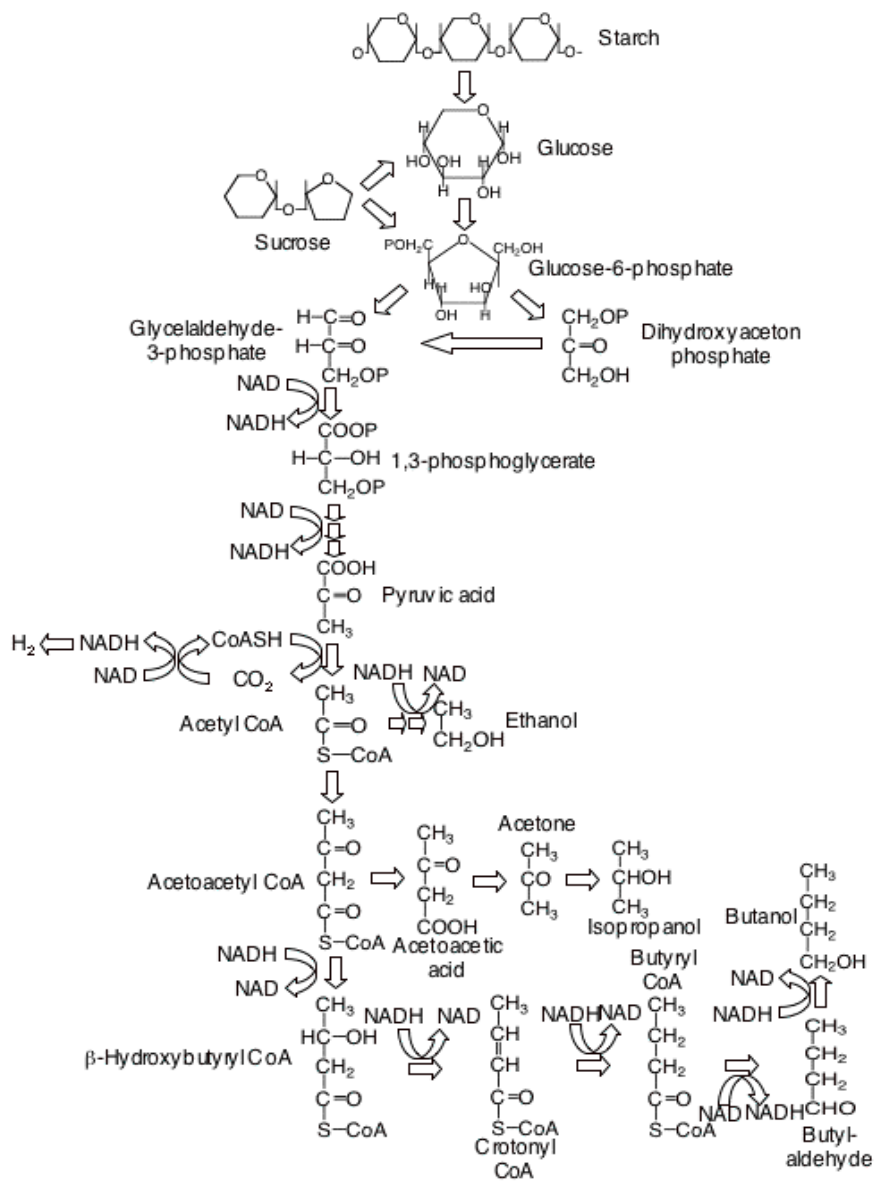


Fig. 5.3.1. Reaction pathway of Acetone-Butanol fermentation.

5.4 水素発酵

5.4.1 水素発酵とは

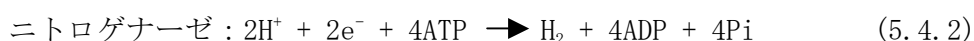
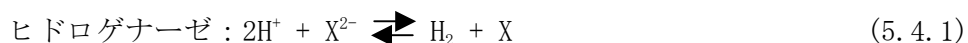
嫌気性微生物が嫌气的条件下で有機物を酸化してエネルギーを得る反応を嫌気性発酵と呼んでいるが、その最終主産物が水素である反応を水素発酵と言う。水素発酵では、水素のみでなく、いくつかの有機酸やアルコール類等の生成を伴う。呼吸と発酵の違いは、呼吸の最終的な電子の受容体が酸素または無機物であるのに対し、発酵の場合は主に原料となる基質が酸化され、二酸化炭素等とともに生成した有機物が最終生産物となることである（例えば、エタノール発酵ではグルコースを基質としてエタノールと二酸化炭素が最終生成物として生じる）。また、ATPの生成系が呼吸では電子伝達系に共役しており、発酵では基質レベルでの反応でATPが生成される。同じ基質から微生物が発酵で獲得できるエネルギーは、呼吸で得られるエネルギーよりも小さくなる。

5.4.2 水素発酵の特徴

発酵の過程において、過剰になった還元力を水素に渡して細胞内のNADHの酸化・還元レベルを調整する反応だけでなく、生産した水素を取り込んで還元力を再生する逆反応が存在する。効率よく水素を生産するためには、水素を消費する逆反応を抑制する必要がある。一般に、水素発酵では有機酸が生成するため、水素発酵後に有機酸の処理を行う必要がある。

5.4.3 水素発酵の反応

水素を生産する微生物は、反応に関与する酵素によって2通りに分類できる。一つはヒドロゲナーゼによるもの、もう一つはニトロゲナーゼによるものである。



X: 電子伝達体 Pi: 無機リン酸

以上の式のように、ヒドロゲナーゼは水素の放出と取り込みの両方を行う可逆反応、ニトロゲナーゼはアデノシン 5'-三リン酸を必要とするエネルギー消費型の反応である。嫌気性発酵では、主にヒドロゲナーゼを用いた水素生産の研究が行われている。代表的な水素発酵の反応例は以下の通

りである。

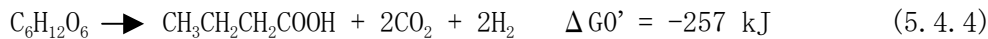


Fig. 5.4.1 に、代表的な水素発酵の経路を示すが、水素は還元型ニコチンアミドアデニンジヌクレオチドおよびフェレドキシンを経由、または直接フェレドキシンを経由、そしてギ酸を経由してヒドロゲナーゼによって生成される。水素発酵では、有機物を分解してその過程で水素が生成される。そのため、廃水処理や廃棄物処理として水素発酵を利用することができる。ただし、水素生産とともに有機酸等の生成を伴うため、単独では廃棄物処理などに適用できないため、例えばメタン発酵や活性汚泥法などの後段処理が必要なる。水素発酵は処理速度が速いため、メタン発酵の前処理技術として注目されている。

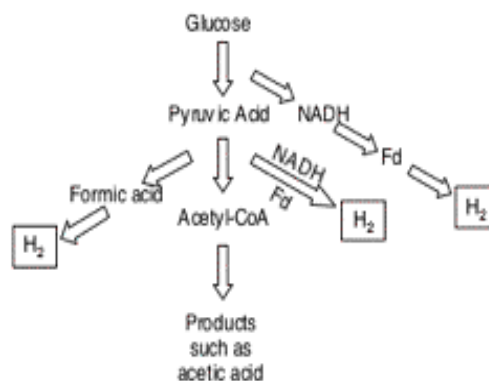


Fig. 5.4.1 Pathway of hydrogen fermentation

5.4.4 水素発酵のエネルギー効率

水素発酵は有機酸生成を伴うため、メタン発酵等と組み合わせる必要がある。水素発酵では、1 mol のグルコースから最大 4 mol の水素が発生する (Eq. (5.4.3))。このとき、同時に生成した酢酸をメタン発酵によってメタンに変換した場合、



になる。よって、水素・メタン二段発酵全体としては、



となり、生成物の高位発熱量は 2.924 MJ (2,924 kJ)となる。一方、メタン発酵単独で処理した場合は、



となり、生成物の高位発熱量は 2.671 MJ (2,671 kJ)である。以上のことから、水素・メタン二段発酵ではメタン発酵に比べて1割程度のエネルギー収率の向上となる。

5.4.5 生成水素の利用

水素発酵やメタン発酵で発生したガスを、ガスタービンやガスエンジンに比べて効率の高い燃料電池に利用した場合を検討する。メタン発酵から発生したメタンを燃料電池に供給するには、メタンを水素に改質する必要がある。



この反応は吸熱反応であるため、反応を進めるためにはエネルギーを投入する必要がある。一般には、650~750℃、ニッケル触媒下でメタンを改質する。一方、水素発酵を行う場合は、エネルギー収率が高くなり、改質せずに燃料電池に利用できる。

参考文献

- Noike, T.; Mizuno, O., Hydrogen fermentation of organic municipal wastes, *Water Sci. Technol.*, **42**, 155-162(2000)
- Rachman, M. A.; Nakashimada, Y.; Kakizono, T.; Nishio, N., Hydrogen production with high yield and high evolution rate in a packed-bed reactor, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **49**, 450-454(1998)
- Tanisho, S.; Tu, H.-P.; Wakao, N. Fermentative hydrogen evolution from various substrates by *Enterobacter aerogenes*, *Hakkokogaku*, **67**, 29-34(1989)
- Taguchi, F.; Yamada, K.; Hasegawa, K.; Taki-Saito, K.; Hara, K. Continuous hydrogen production by *Clostridium* sp. No.2. from cellulose hydrolysate in an aqueous two-phase system, *J. Ferment. Bioeng.*, **82**, 80-83(1996)
- Ueno, Y.; Otsuka, S.; Morimoto, M.; Hydrogen production from industrial waste-water by anaerobic microflora in chemostat culture, *J. Ferment. Bioeng.*, **82**, 194-197(1996)

5.5 乳酸発酵

5.5.1 乳酸発酵とは

乳酸は分子内にアルコール基 (OH) とカルボニル基 (COOH) を有する有機化合物である。不斉炭素を有するため、D 体、L 体の光学異性体がある。近年、バイオマスプラスチックであるポリ乳酸の原料として、100%近い高い光学純度の乳酸の需要が高まっている。一般に、乳酸は化学合成と微生物を用いた乳酸発酵でつくられる。化学合成法ではラクトニトリルの加水分解法が用いられるが、この場合、D 体と L 体が半分ずつできるため、光学純度は 0 である。したがって、ポリ乳酸の原料としての乳酸は発酵法でつくられている。乳酸は細菌、あるいは、カビを用いた発酵法によりつくられるが、ここでは細菌 (乳酸菌) による乳酸発酵について述べる。

5.5.2 乳酸菌について

乳酸菌とは、炭水化物などの糖類を代謝し、多量の乳酸を生成する一群の細菌の総称である。形態的性質として、グラム陽性の桿菌または球菌、通性嫌気性、カタラーゼ陰性、内性胞子を作らず、運動性を持たない。また、生理的性質として、糖を唯一のエネルギー源として使い、消費した糖を 50%以上乳酸に変換する。以上の定義に当てはまる細菌群は、*Lactobacillus* 属、*Leuconostoc* 属、*Pediococcus* 属、*Streptococcus* 属の四属である。乳酸菌は増殖速度が速く、高い生産性で乳酸が得られるが、様々なビタミン、アミノ酸等の栄養を要求するので、培地組成は単純でない。乳酸発酵は、ホモ乳酸発酵とヘテロ乳酸発酵に大別される。ホモ乳酸発酵は単糖 1 mol から 2 mol の乳酸と 2 mol の ATP を生成し、ほぼ 100%の収率で消費した糖を乳酸に変換する。一方、ヘテロ乳酸発酵は糖を代謝し、乳酸と乳酸以外の物質に変換する。この発酵形式は、①乳酸、エタノール、CO₂ を生成する形式と②単糖 1 mol から乳酸 1 mol と酢酸 1.5 mol を生成する形式の 2 つに分けられる。乳酸菌は L-乳酸脱水素酵素と D-乳酸脱水素酵素のどちらか、もしくは両方をもつ。そのため、L 乳酸のみ、D 乳酸のみ、あるいは、両方の乳酸がつくられる。乳酸菌のほとんどがラセミ化酵素を持っており、生成乳酸の光学純度に影響を与えている。しかし、ほぼ 100%の光学純度で L 乳酸を生成する細菌として *Lactobacillus rhamnosus* が知られており、これを用いることにより、ポリ乳酸の原料になる品質の乳酸を得ることができる。

5.5.3 乳酸発酵原料としてのバイオマス

乳酸発酵の原料は基本的にグルコースであり、デンプンの加水分解物が一般的な直接の原料であ

る。トウモロコシ、小麦、米等の農作物が原料になる。しかし、バイオエタノールの生産で問題になっているように、これら食糧になり得るバイオマスは、食糧との競合が常に懸念される。したがって、籾殻や稲わらのような未利用のソフトセルロース系バイオマスが注目されている。未利用のバイオマスは、当然、価値が低く利用できないから未利用なのであって、これらを発酵原料に変換するためには、様々な条件が求められる。まず、常に一定量のバイオマスが安定に供給されなければならない。次に、原料の糖に容易に変換できなければならない。その際、変換に要するエネルギーはできる限り少なくなければならない。また、原料としての品質も問われる。もちろん、さらに効率的な発酵のための革新的技術の開発も必要であるが、それと同時に、バイオマスの集荷、蓄積、エネルギー、コスト等の問題の解決も重要である。

5.5.4 パームオイル産業の未利用バイオマスの利用

パームオイルは世界3大植物油のひとつである。赤道周辺のみで栽培できる通年収穫可能な農作物であるが、その搾油工程で未利用のバイオマスが10 Tg (1千万 t)を超える量で排出されている。しかも搾油工場は大型で、数が限られている。そのため、1工場に集まる品質の安定した未利用バイオマスの量は数十 Gg (数万 t)になり、これらは年間を通じて、安定に集荷可能である。さらに、近年、特にマレーシアでは再植林の時期であり、今後、大量の油ヤシの幹が廃棄される。最近、この中に多くのグルコースが含まれており、サトウキビのように圧搾するだけで回収できることが示され、糖源として注目される。

5.5.5 食品ごみからの乳酸発酵

日本の場合、狭隘な国土と大きな人口密度のため、廃棄物を埋立処理のみに頼ることはできない。そのため、2000近いごみ焼却炉が散在し、ごみは焼却処理されている。毎日、ごみが集荷され、焼却され、熱が発生し、一部は発電に利用されている。したがって、未利用の低温蒸気は利用可能である。ごみの中には重量で30%程度の生ごみが含まれているが、特に、スーパーマーケットやコンビニ二等から排出される事業系のごみでは、生ごみの分別は容易である。日本の生ごみにはでんぷん分が固形分の半分近く含まれており、毎日の組成変化にも関わらず、安定した糖源になり得る。さらに、乳酸菌の難点であるビタミン等多くの栄養成分が生ごみに含まれていることも利点である。Fig. 5.5.1に様々な生ごみをグルコアミラーゼで処理した後、*Lactobacillus rhamnosus*を用いて発酵させて得た乳酸収率と示す。一般的に、生ごみは80%程度水分で占められているため、生ごみあたり10%程度の乳酸収率は高い反応収率であることがわかる。

5.5.6 乳酸の精製

ポリ乳酸の原料になるには光学純度だけでなく、乳酸そのものの純度も高くなければならない。しかし、乳酸菌による乳酸発酵の場合、培地組成が複雑で、そのような培地から乳酸を精製せねばならない。このような場合、エステル化してからの蒸留が一般的である。たとえば、乳酸発酵液中の乳酸をブチルエステル化し、乳酸ブチルとして蒸留精製する方法がある。この方法は生ごみの乳酸発酵液から乳酸を精製す

ることさえできる。さらに、発酵 pH を調整するためのアンモニアも同時に回収できるが、エステル化の際に発酵液中の水分をすべて除去せねばならず、化石燃料を使用したなら多くの炭酸ガスの放出を招く。しかし、この問題は廃棄物の焼却時に発生する熱を有効に利用することで解決できる。

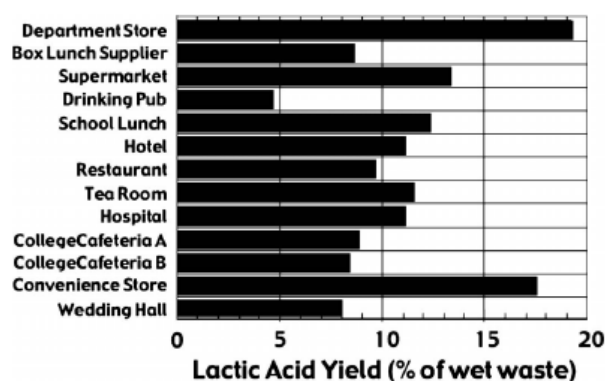


Fig. 5.5.1. Lactic acid yield from lactic acid fermentation with kitchen garbage

参考文献

- Morichi, T. Physiology and metabolism of lactic acid bacteria: *Biseibutsu* **6**(1), 27-34 (1990) (in Japanese)
- Sakai, K.; Murata, Y.; Yamazumi, H.; Tau, Y.; Mori, M.; Moriguchi M.; Shirai, Y. Selective proliferation of lactic acid bacteria and accumulation of lactic acid during open fermentation of kitchen refuse with intermittent pH adjustment: *Food Science and Technology Research*, **6**, 140-145 (2000)
- Hassan, M. A.; Nawata, O.; Shirai, Y.; Nor'Aini A. R.; Phang L. Y.; Ariff, B. A.; Abdul Karim, M. I. A Proposal for Zero Emission from Palm Oil Industry Incorporating the Production of Polyhydroxyalkanoates from Palm Oil Mill Effluent: *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **35** (1) 9-14 (2002)
- Sakai, K.; Taniguchi, M.; Miura, S.; Ohara, H.; Matsumoto, T.; Shirai, Y. Novel process of poly-L-lactate production from municipal food waste: *Journal of Industrial Ecology*, **7**(3, 4), 63-74 (2004)
- Mori, T.; Kosugi, A.; Murata, Y.; Tanaka, R.; Magara, K. Ethanol and Lactic Acid Production from Oil Palm Trunk: Proceedings of Annual meeting of the Japan Institute of Energy, **16**, 196-197 (2007) (in Japanese)

5.6 サイレージ

5.6.1 サイレージとは

サイレージとは、新鮮な飼料作物や牧草などを材料とし、乳酸菌の力を巧妙に利用して調製された家畜の貯蔵飼料である。細切した飼料作物・牧草の原料をサイロ内に詰め込んで密封し、乳酸発酵による低 pH 状態と嫌気状態を形成し、腐敗の原因となるカビや好気性菌類の活動を抑え長期保存が可能となる。サイレージの貯蔵はタワー、バンカー及び地下などの固定型サイロで行うが、これらが不足する場合には、ロールベールかスタークサイロを活用する (Fig. 5.6.1)。サイレージは乾草に比べ養分保持性と嗜好性が優れている。また天候に左右されることなく調製されるので、主要な飼料貯蔵法として世界で広く利用されている。



Fig. 5.6.1. Forage cutting (left) and stack silo (right).

5.6.2 サイレージ調製

サイレージの調製は、古代エジプト時代に「余剰草堆積の自然発酵」から始まると言われ、その発酵機序に関する本格的な研究は主として、20 世紀に入ってから急速に進展した。これまでのサイレージ調製に関する研究成果としては、古くからの細切や圧密などによる嫌気条件の保持、ビートパルプなどを添加する材料草の水分の調整、糖蜜などを添加する材料草糖含量の補充などの調製技術が世界的に普及されてきた。サイレージ発酵スターターとして、生産現場でも使いやすい凍結乾燥型乳酸菌製剤 (Fig. 5.6.2) や繊維分解酵素セルラーゼ製剤が応用されるようになり、それらによるサイレージの発酵品質の改善効果が次第に広く認知されるようになってきた。



Fig. 5.6.2. Cell form (left) and inoculant (right) of lactic acid bacteria “Chikuso 1”.

5.6.3 サイレージ発酵

材料草に付着または添加する乳酸菌が材料草中の可溶性糖類を基質として乳酸を生成する。乳酸だけを生成するホモ型発酵と、乳酸、酢酸、エタノール、炭酸ガスを生成するヘテロ型があり、乳酸菌の種類によって異なる。サイレージ発酵に関与する乳酸菌は *Lactobacillus*、*Leuconostoc*、*Lactococcus*、*Enterococcus* および *Weissella* など多数の属に分類される。飼料作物に付着する乳酸菌の種類、その菌数、発酵形式および生成乳酸の光学異性は、サイレージの発酵品質ばかりでなく、栄養価値や反芻家畜の生理代謝に影響を与える。また、材料草に共生する酪酸菌、好気性細菌、糸状菌および酵母などの微生物は、乳酸菌の発酵を競合的に阻害し、サイレージ品質の劣化や発酵損失を招く原因となる。サイレージ発酵初期に酪酸菌による酪酸生成や蛋白質分解は避け難いが、嫌気状態と低 pH 状態が確保されると一般細菌の増殖が停止しサイロ内サイレージ発酵状態が安定になる。

しかしサイロを開封する後、サイレージが空気にさらされる部分に、好気性細菌、カビや酵母が増殖し、発熱を伴って変質することがある。この現象をサイレージ好気変敗という。サイレージの好気変敗は発生すると、乾物の損失や栄養価の低下が生じ、乳牛に給与する場合、摂取量と乳量の低下と下痢の発症を引き起こす。

5.6.4 ロールベールサイレージ

ロールベールサイレージはロールベールを用いて牧草やワラの収草列を拾い上げ、円柱状に圧縮梱包して、ストレッチフィルムで密封するタイプである。拾い上げた時に牧草を切断して梱包密度を高め、かつ解体を容易にしたカッティングロールベールも開発される。詰め込み遅れなどに不良発酵を回避できるほか、調製作業の省力化、サイレージ流通化、固定サイロ建設の費用軽減などの利点が多いと指摘されている。

近年、飼料の低コスト化と飼料自給率向上のために、稲わらなどバイオマスが積極的に利用され

ている。食用稲成熟期にモミを収穫した直後の生稲わらは、ロールベアラとベールラップで梱包とラッピングをされ、ロールベールサイレージが調製されている (Fig. 5.6.3)。今後、ロールベールサイレージ調製技術を活用して、作物ワラなどのバイオマス資源の飼料生産に利用されることも期待される。



Fig. 5.6.3. Roll bale silage making (left) and wrapping (right) of rice straw.

5.6.5 技術の現状

ロールベールサイレージの生産利用体系が日本を含め世界多くの国に普及されている。現在、日本では飼料自給率向上のためにトウモロコシ、飼料イネ専用細断型ロールベアラやサイレージ添加用新規乳酸菌製剤が開発されている。また、資源循環社会の構築および環境負荷の低減などの観点から、作物・食品副産物など低未利用バイオマスサイレージ調製や家畜への給与技術についての研究も進められている。

参考文献

Abe, A., The best use manual of food circulation resource, Science Forum. (2006)

Cai, Y., Silage, Dairy Japan (2004)

McDonald, P.;Henderson, N.;Heron, S.,The Biochemistry of Silage, 2nd ed., Chalcombe Publications (1991)

5.7 コンポスト化

5.7.1 コンポストの定義

コンポストとは、わら、もみがら、樹皮、動物の排せつ物その他の動植物の有機物（汚泥、魚介類の臓器を除く）をたい積または攪拌し、腐熟させたものである。但し、汚泥や魚介類の臓器からの生産物も、処理プロセスからすればコンポストの範疇に入れる場合がある。

5.7.2 コンポスト化の原理

コンポスト化とは、有機物をたい積し、攪拌、通気して好気性状態とし、微生物により原料中の有機物を分解、この分解により発生する熱により、水分を蒸発、病原菌や雑草種子等を死滅あるいは不活性化して、衛生で安全、かつ安定化したものとするものである。コンポスト化過程のイメージを Fig. 5.7.1 に示す。コンポスト化のメリットは、①ふん尿などの汚物感や悪臭をなくし、衛生的な使用者にとって取り扱いやすいものにできること、②土壌や作物にとって安全でかつ良質な肥料成分を適度に含む栄養分にできること、③資源循環型社会の構築に貢献可能なものができることがあげられる。

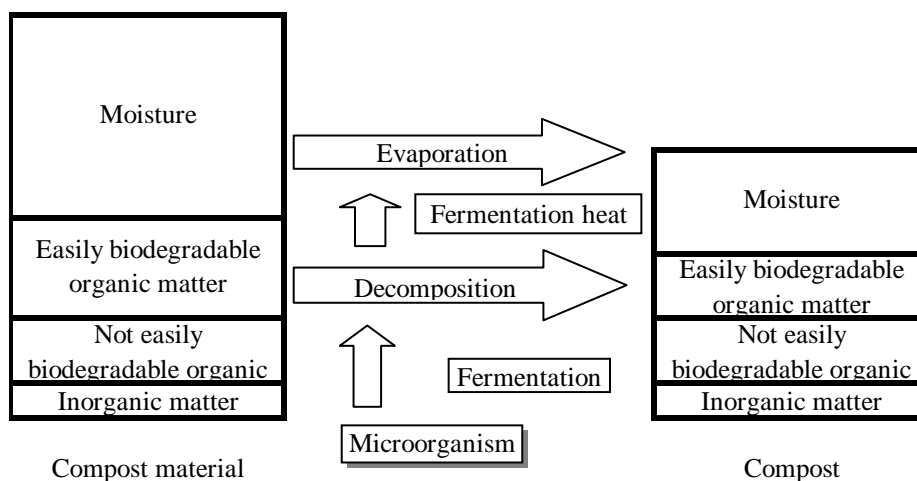


Fig. 5.7.1. Concept image of composting process.

5.7.3 コンポスト化の基本構成

コンポスト化の基本構成は、(a)前処理施設、(b)発酵施設、(c)製品化施設から構成される。

(a) 前処理施設

前処理施設は、コンポスト原料の性状により、水分、有機物の調整、粒径、通気性などを行うた

めの設備を有する。一般的に、コンポスト化をスタートするときは、水分を 55～70%程度に調整して、通気性をよくする必要がある。その前処理方式には、添加方式（副資材の添加、副資材：もみ殻、おがくず、チップなど）、返送方式（製品コンポストを返送し、コンポスト原料と混合）、乾燥方式（外部エネルギーによる乾燥）がある。

(b) 発酵施設

発酵施設は、発酵槽、通気設備、加水設備からなる。発酵槽においては、有機物の分解、発熱により発酵槽内たい積物の温度が上昇するので、コンポスト原料全体の発酵温度を 65℃以上、かつ 48 h 以上保持することにより、安全でかつ衛生的な製品コンポストを生産することが最低条件となる。発酵方式には、たい積式と機械切返し式大別され、たい積方式は、コンポスト原料、副資材、返送コンポストなどをフロアにたい積させ、適宜、ショベルローダなどで切返しを行う。機械切返し方式は、原料投入口と排出口を持ち、発酵槽の側壁の上部に攪拌用の攪拌装置を設置したものである。通気設備は、原料を均一な好気状態に保ち、発酵させると同時に原料から水分を蒸発させるために、通気を行う。加水設備は、発酵過程で、原料などの水分が 40%以下になると微生物が停止するために、好気性発酵を継続させるために、原料などに加水を行う。

(c) 製品化施設

製品化施設は、製品コンポストの取り扱い性や商品価値を高めるために、ふるい分けや袋詰設備などからなる。その他の施設として、環境対策の一環として、脱臭設備が必要となる。

5.7.4 コンポスト化技術の現状

コンポスト化が可能な主な原料は、Table 5.7.1 に示すようなものである。もみ殻や木質系原料は、生物分解性物質の含有量が低く分解に時間がかかるが、土壌改良剤としては効果があり、他の原料との組み合わせとして高品位なコンポストの生産が可能である。生ゴミは、プラスチックや金属、ガラスなど発酵不適物質の混入が多く、分別収集の徹底や適切な前処理が必要となる。汚泥については、重金属の混入への留意が必要となる。

資源化技術としては、コンポスト化、バイオガス化、乾燥、炭化、飼料化、焼却がある。コンポスト化は、各種原料に対応でき、技術あるいは流通などの面で優位性がある。しかし、需要量と需要時期が限定され、コンポストの余剰が発生する地域もある。今後は、コンポストの品質管理を徹底して、地域で発生する全量の原料をコンポスト化し、地域内で全量利用するという地産地消が前提で展開する必要がある。

Table 5.7.1. Comparison of materials available for composting and other recycling technologies (Japan Organics Recycling Association 2004).

Material Name	Type	Composting	Biogas	Drying	Carbonization	Livestock feed	Incineration
Livestock	Cattle dung	◎	○				
	Cattle dung/urine	○	◎				
	Dairy cow dung	◎	○				
	Dairy cow dung/urine	△	◎				
	Pig dung	◎	○				
	Pig dung/urine	△	◎				
	Chicken dung	◎		◎	◎		◎
Garbage	Raw garbage	◎	◎		△	△	○
Sludge	Dehydrated sludge	◎	◎	◎	○		○
Crop residue	Rice husks	◎			◎	△	◎
	Paddy straw	◎				○	
Wood	Sawdust	○			△		◎
	Bark	◎					◎
	Pruning waste	○			◎		◎
	Chips	◎			◎		◎

Note: ◎: Matches category ○: Usable △: Usable after preprocessing

参考文献

Japan Livestock Industry Association Ed., *Composting Facility Design Manual*(2003) (in Japanese)

Japan Organics Recycling Association Ed., *Composting Manual*(2004) (in Japanese)

Livestock Industry's Environmental Improvement Organization Ed., *Livestock Dung Process Facility – Machine Setup Guidebook (compost processing facility version)* (2005) (in Japanese)

第6部 持続するためのシステム開発

6.1 LCAの基礎

6.1.1 ライフサイクルアセスメントとは

ライフサイクルアセスメント(Life Cycle Assessment: LCA)は、製品やサービスについて資源の採掘から生産・使用・廃棄まで含めたライフサイクル全体での資源消費量や排出物量を計量し(インベントリ分析)、その環境への影響を評価する(影響評価)手法である。

1997年に発行された、LCAの「原則および枠組み」に関する国際標準規格(ISO-14040)では、LCAを「サービスを含む製品に付随して生じる影響をより良く理解し、軽減するために開発された一つの技法」とし、実施する際の「目的と調査範囲の設定」、「インベントリ分析」、「影響評価」、「結果の解釈」という4つのステップが明確にされている(Fig. 6.1.1)。

6.1.2 目的と調査範囲の設定

このステップにおいては、対象とする工業製品やサービスを定め、LCAを実施する目的を明確にする。たとえば、「冷蔵庫の地球温暖化に対する影響」を評価することを定める。目的にしたがっ

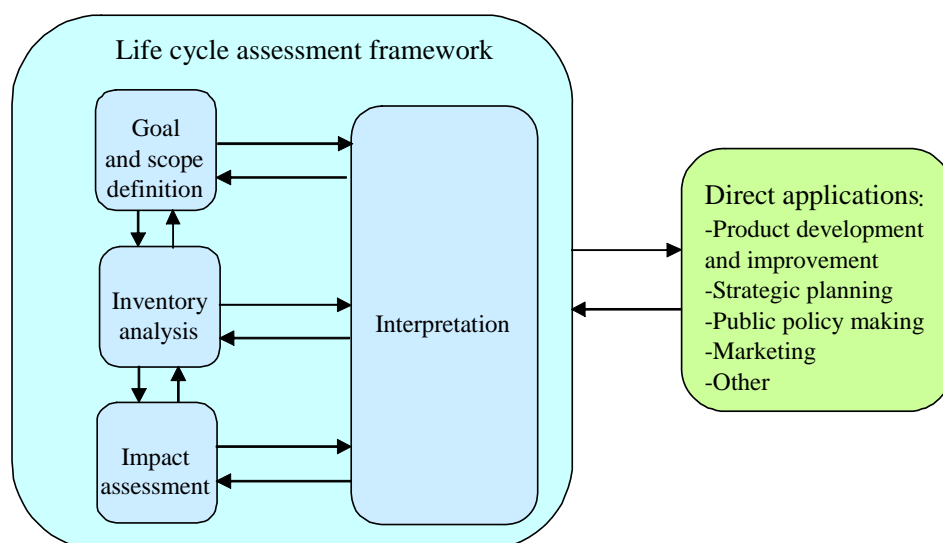


Fig. 6.1.1. Phases of LCA.

て計量すべき排出物を決め、それを収集する範囲を定める。

LCAにおいて評価する対象は、本来は、その製品の「機能」である。たとえば、「冷蔵庫」であれば「庫内のものを冷やす」機能である。したがって、機種異なる冷蔵庫を比較する場合は、同じ容積・同じ耐用年数など「機能」を同一にして比較することが求められる。

また、LCAを実施する場合には、対象とする製品に關与するプロセスの全てを網羅することは困難であることが多い。LCA実施の目的に照らして寄与の小さいプロセスは、調査の対象外とされる。その選定基準をカットオフルールと呼ぶ。LCA実施の目的によって重要となるプロセスが異なるので、カットオフに関する一般的な規則は存在しない。目的に合致した調査の範囲を選定しなければならない。

6.1.3 インベントリ分析 (LCI)

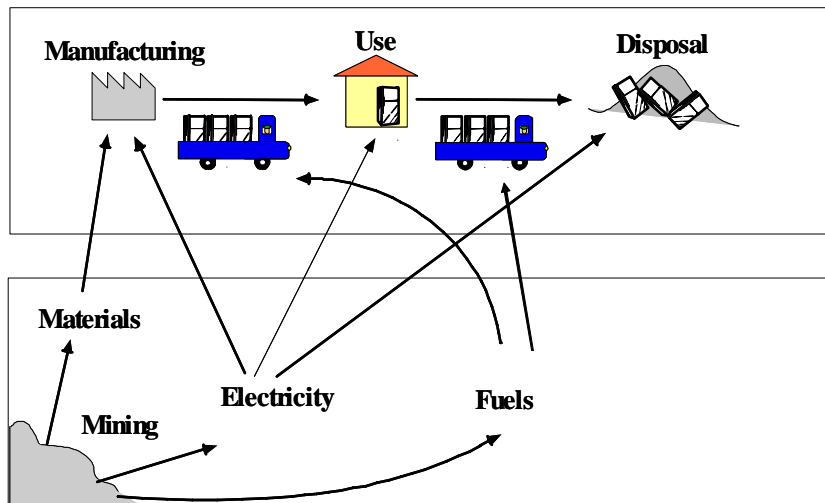
インベントリ分析 (Life Cycle Inventory) は、LCA実施の目的に合致するように設定された調査の範囲 (製品システム) 全体での資源消費量や排出物量を算定するステップである。

インベントリ分析を実施する際は、まず対象とする製品の製造・使用・廃棄に係わるデータの収集が必要である。これらのデータは、一般に「フォアグラウンドデータ」と呼ばれる。実施者によって収集されるべきデータである。

次に、製品に使用される素材の製造や、使用段階で消費される電気を発電する時の排出物量などを調査する。これらは一般に「バックグラウンドデータ」と呼ばれる。LCAの実施者には収集が困難であり、文献やLCAの実施例から引用しなければならないことが多い。文献から得たデータを用いる場合、文献ごとに (素材ごとに) 使用している電気の製造や重油の燃焼による排出物量などのデータが異なることがあるので、データの整合性に注意する必要がある。Fig. 6.1.2にフォアグラウンドデータとバックグラウンドデータの関係を示した。

インベントリ分析においては、「システム境界」と「配分方法」が二つの大きな問題となっている。システム境界とは、データに含まれる範囲であり、LCA実施の目的に合致し、重要な工程が欠如していないシステム境界が選定されなければならない。また一つのプロセスで2種以上の製品が得られる場合は、排出物量や資源の消費量を製品ごとに配分することが必要になる。一般には、製品の重量比で配分することが行われる。しかし、市場価値が大きく異なる製品が生産される場合には、生産金額で配分することが適当とする考え方もある。

Foreground Data (LCA Practitioner)



Background Data (Existing Database)

Fig. 6.1.2. Foreground data and background data

6.1.4 影響評価

LCAでの影響評価は、一般的に、分類化、特性化、総合評価の3つの部分から成る。分類化では、資源消費や排出物を予想される環境影響の種類に基づいた影響カテゴリに振り分ける。Table 6.1.1にSETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry)-EUROPEの環境影響カテゴリのデフォルトリストを示した。LCAの実施では、これらの中のどの環境カテゴリについての評価を行うのか、「目的と調査範囲の設定」で明確にする必要がある。

特性化では、排出物量と、その物質が指定された影響カテゴリに対して与える影響を相対的に評価した特性化係数を掛け合わせ、「カテゴリインディケータ」として指標化する。この関係を地球温暖化とオゾン層の破壊を例にとり、影響評価の一般的手順として Fig. 6.1.3 に示した。特性化係数には、「地球温暖化係数」のようなカテゴリに対して排出物が持つ潜在的影響（ポテンシャル）を示す数値が使用されることが多い。

Table 6.1.1. Impact categories list of SETAC-Europe.

A. Input related categories (“resource depletion or competition”)

- | | |
|--|------|
| 1. abiotic resources (deposits, fund, flows) | glob |
| 2. biotic resources (funds) | glob |
| 3. land | loc |

B. Output related categories (pollution)

- | | |
|---|-------------------|
| 4. global warming | glob |
| 5. depletion of stratospheric ozone | glob |
| 6. human toxicological impacts | glob/cont/reg/loc |
| 7. ecotoxicological impacts | glob/cont/reg/loc |
| 8. photo-oxidant formation | cont/reg/loc |
| 9. acidification | cont/reg/loc |
| 10. eutrophication (incl. BOD and heat) | cont/reg/loc |
| 11. odour | loc |
| 12. noise | loc |
| 13. radiation | reg/roc |
| 14. casualties | loc |

Pro Memoria: Flows not followed up system boundary

- input related (energy, material, plantation, wood, etc.)
- output related (solid waste, etc.)

なお、ISO-14040 では、分類化・特性化までを影響評価の要素とし、正規化(Normalization)やカテゴリ間の重み付けは付加的要素(optional elements)と位置づけている。「地球温暖化」や「オゾン層の破壊」というカテゴリ内で、二酸化炭素や特定フロンを基準物質とする指標化はできるが、これらの異なる環境カテゴリの重要性を総合的に判断し単一の指標化を行うことは、困難と認識された結果である。

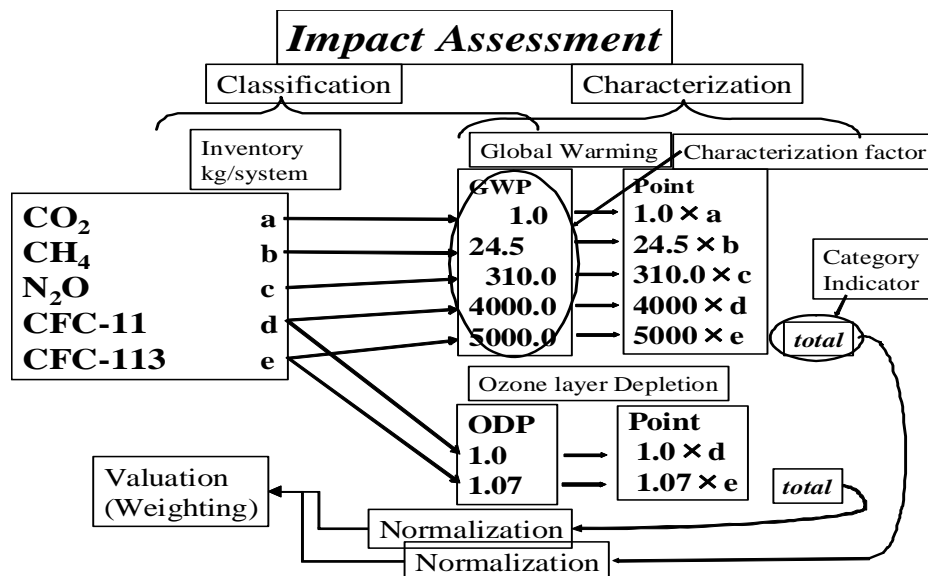


Fig. 6.1.3. General Procedure of Impact Assessment.

6.1.5 解釈

LCA では、実施した調査の範囲の相違、インベントリ分析におけるシステム境界の定義や配分方法、および影響評価における特性化係数の選択によって、異なる結果が導かれる可能性がある。これらの実施方法による結果への影響が「解釈」で考察されなければならない。

また、現状のインベントリ分析では、多くの場合、結果である排出物量や資源消費量が単一の数値として示される。しかし、それぞれのプロセスデータには、測定誤差や推定誤差が含まれている。ISO 規格では、データの「完全性」や「代表性」などの質の評価が必要とされている。

参考文献

SETAC "Guidelines for Life-Cycle Assessment A code of Practice", 1993

SETAC "Towards a Methodology for Life Cycle Impact Assessment", 1996

6.2 エネルギー効率

バイオマスをエネルギーとして利用する際には、エネルギー変換技術のエネルギー効率を考えることも重要であるが、前節で述べたようにライフサイクル全体でのエネルギー効率や環境負荷を考慮しなければならない。つまり、Fig. 6.2.1 に示すように、バイオマス生産、前処理、エネルギー変換と言った一連のステージを評価する必要がある。

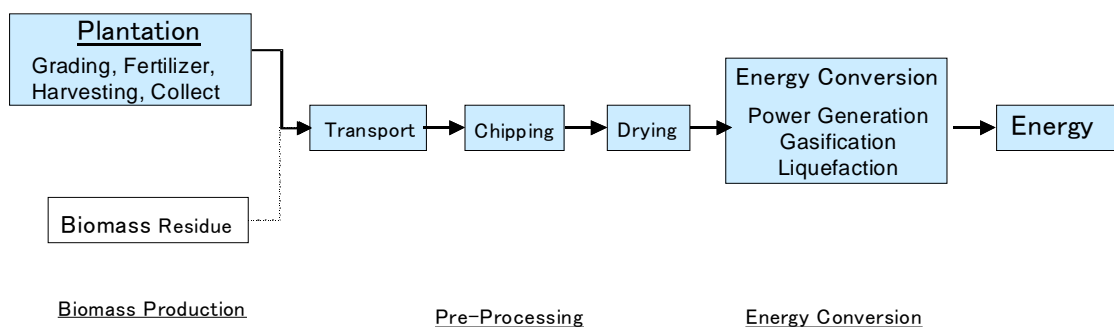


Fig. 6.2.1. Life Stages of Biomass Energy Conversion.

6.2.1 バイオマスの育成、収穫にかかるエネルギー

バイオマス生産は、対象としている地域の気象条件、樹種によって成長量や発熱量が異なるため、

Table 6.2.1 のような仮定が必要になる。Table 6.2.2～Table 6.2.4 に文献を参考にして植林エネルギーをまとめた。なお、電力は日本の発電効率（38.1%）に基づいて一次エネルギー換算した。Table 6.2.4 に示したブラジルの実施例は、パルプ生産を目的とした植林であるが、バイオマスエネルギー生産技術と同様として列挙した。成長速度は単位面積あたりの値を示しているため、植栽間隔に依存するものである。また、ブラジルの実施例は人的作業が多いことから、エネルギー使用量が少なく算出されている。

バイオマス生産技術のエネルギー効率は、Table 6.2.2～Table 6.2.4 のエネルギー使用量と Table 6.2.1 の発熱量を比較することで求めることができる。たとえば北アメリカの実施例では、単位質量あたり発熱量が 18.8 MJ のバイオマスを生産するために、1.4 MJ（約 7.4%）のエネルギーを使用している。

Table 6.2.1. Features of tree.

	North America	Indonesia	Brazil
Tree	Poplar	Acassia	Eucalyptus
Growth rate [t-dry/ha/year]	10	7.5	5.8
Calorific value [MJ/kg-dry]	18.8	16.7	18.8
Carbon content	0.5	0.5	0.5

Table 6.2.2. Planting energy in North America.

	Diesel Oil [MJ/kg-dry]	Natural Gas [MJ/kg-dry]	Electricity [MJ,kWh/kg-dry]		Total [MJ/kg-dry]
Grading	0.014	-	-		0.014
Fertilizer	0.024	0.281	0.073	0.0078	0.378
Pesticide	0.029	0.010	0.005	0.0006	0.044
Machinery	0.017	-	-		0.017
Harvest	0.731	-	-		0.731
Transport	0.240	-	-		0.240
Total	1.055	0.291	0.079	0.0083	1.425

Table 6.2.3. Planting Energy in Indonesia.

	Diesel Oil [MJ/kg-dry]	Natural Gas [MJ/kg-dry]	Electricity [MJ,kWh/kg-dry]		Total [MJ/kg-dry]
Grading	0.367	-	-		0.367
Fertilizer	0.032	0.375	0.073	0.0078	0.480
Pesticide	0.039	0.013	0.005	0.0006	0.057
Machinery	0.225	-	-		0.225
Harvest	0.225	-	-		0.225
Transport	0.408	-	-		0.408
Total	1.296	0.388	0.079	0.0083	1.763

Table 6.2.4. Planting Energy in Brazil.

	Diesel Oil [MJ/kg-dry]	Natural Gas [MJ/kg-dry]	Electricity [MJ,kWh/kg-dry]	Total [MJ/kg-dry]
Grading	0.024	-	-	0.024
Fertilizer	0.047	0.225	0.092	0.364
Pesticide	0.050	-	-	0.050
Machinery	-	-	-	0.000
Harvest	0.035	-	-	0.035
Transport	-	-	-	0.000
Total	0.156	0.225	0.092	0.473

6.2.2 バイオマスエネルギー変換技術の前処理にかかるエネルギー

森林バイオマスを利用する場合、植林地からの輸送、粉碎（チップ化）、乾燥等の前処理が必要になる。想定する変換技術によって要求されるチップの大きさやバイオマスの含水量は違うが、Table 6.2.5 に輸送エネルギー、粉碎エネルギー、乾燥エネルギーの一例を示す。輸送エネルギーは、燃費 3 km/L、最大積載量 20 t のトラックを用いて、5 t-dry のバイオマスを積載して輸送することを想定して求め、粉碎エネルギーは文献より引用した。乾燥エネルギーは含水率 50% から 20% に乾燥させることを想定し、水の蒸発熱に約 2 割の熱損失を見込んで求めた。仮に輸送距離を 30 km にした場合の前処理にかかるエネルギーはそれぞれ、輸送：75 MJ/t-dry (3.6%)、粉碎：0.786 MJ/t-dry (0.037%)、乾燥：2032 MJ/t-dry (96.4%) となり、この条件では輸送工程のエネルギー消費量の比率は小さい。なお、乾燥に関わるエネルギー消費量は、自然乾燥、余熱を利用した乾燥等の実施により削減できる可能性がある。

Table 6.2.5. Energy Consumption on Pretreatment.

Energy Consumption		
Transportation (Truck)	Diesel Oil	2.5 MJ/t-dry/km
Crushing Energy	Electricity	0.0832 kWh/t-dry ²⁾
Drying Energy	Heavy Oil	2,030 MJ/t-dry

6.2.3 バイオマスエネルギーと化石燃料のエネルギー効率の比較

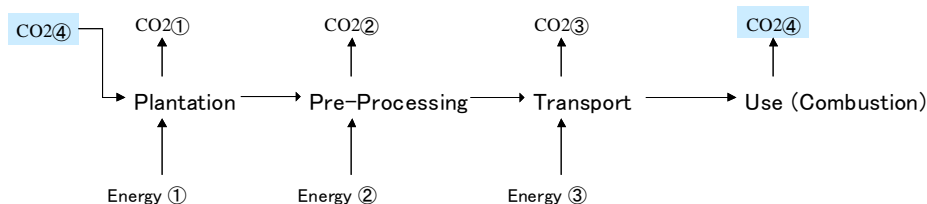
バイオマスエネルギーと化石燃料エネルギー（石炭）1 MJ を生産するために必要なエネルギー（Table 6.2.6）の比較を行った。簡単のために、バイオマス、石炭の産地から使用地までの輸送はないものとした。つまり対象範囲としては、Fig. 6.2.2 のバイオマスと化石燃料のエネルギー消費量と CO₂ 排出量の算出イメージにおけるエネルギー①+②と①'+②' であり、バイオマスについ

ては植林のエネルギーと、前処理として粉砕、乾燥エネルギーを計上した。なお、石炭の採掘等は豪州のデータを引用している。比較結果を Fig. 6.2.3 に示した。バイオマス生産時のエネルギー消費量は、北アメリカ：0.182 MJ/MJ-バイオマス、インドネシア：0.200 MJ/MJ-バイオマス、ブラジル：0.132 MJ/MJ-バイオマスに対して、石炭の場合は、0.008 MJ/MJ-石炭 程度である。同じエネルギーを製造するとき使用するエネルギーはバイオマスの方が非常に大きいことがわかる。しかしながら、LCA の評価ではエネルギー資源の消費という環境負荷を定量評価する場合には、枯渇性の資源使用量を対象とするため、想定した持続可能な植林によって得られたバイオマスについてはエネルギーの消費としてはカウントされない。エネルギーを使用した場合、石炭は 1MJ の使用量が加算されるので、その消費量は逆転する。

Table 6.2.6. Energy consumption of coal mining.

Energy Source		Open-Cut Mining	Underground Mining
Electricity	kWh/t-coal	9.61	19.4
Diesel Oil	Kg/t-coal	4.158	0.6639
Gasoline	Kg/t-coal	0.01327	0.0113

Biomass Energy



Fossil Fuel Energy

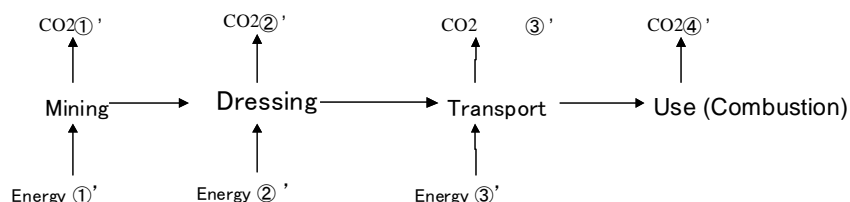


Fig. 6.2.2. Energy consumption and CO₂ emission image on biomass and fossil fuel.

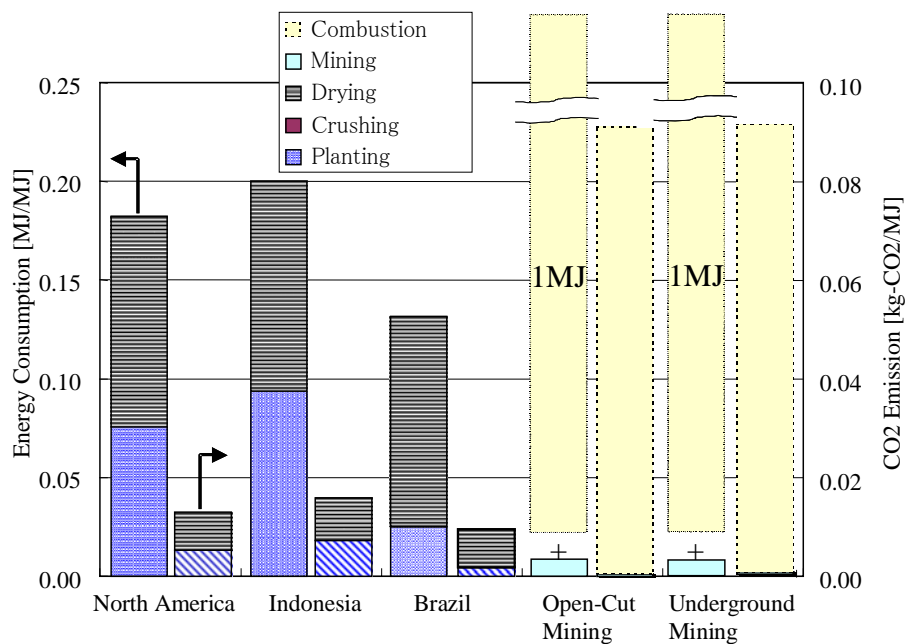


Fig. 6.2.3. Comparison Between Biomass and Coal on Energy Consumption and CO2

参考文献

Turhollow, A.F. and R.D. Perlack, Biomass and Bioenergy, 1(3), pp.129-135, 1991

NEDO, "Investigation of forest from a viewpoint of global environment (the 2nd) (a case study of planting)", NEDO-GET-9603, 1996 (in Japanese)

Yokoyama, S., "Eucalyptus Plantation in Brazil, Resources and Environment", Shigen to Kankyo, pp.431-436, 1996 (in Japanese)

IEEJ (Institute of Energy and Economics in Japan), "Life Cycle Inventory Analysis of Fossil Energies in Japan, IEEJ, 1999 (in Japanese)

6.3 CO₂ 排出と環境影響

6.3.1 バイオマスのCO₂ 排出量

前節のバイオマスのエネルギー評価において、投入される植林エネルギーは、軽油、天然ガス、電力であり、粉碎エネルギーは電力、乾燥エネルギーは重油を使用している。また、石炭採掘には軽油、ガソリン（軽油相当）、電力を使用している。それぞれCO₂排出量を求めるには、軽油、重油、ガソリン、天然ガスについてはその燃焼により排出されるCO₂の排出原単位に加えて、その製造過程において排出されるCO₂排出量を考慮する必要がある。電力については、電源構成を考慮したCO₂

排出量が必要となる。ここでは、これらのエネルギーの生産に伴う CO₂ 排出量は、日本と同等と仮定し、Table 6.3.1 に示す LCA により求めた排出原単位 (Tahara 1997, Tahara 1998) を用いて検討した。

Table 6.2.2~Table 6.2.5 で示したバイオマス生産に関するエネルギー使用量に、Table 6.3.1 で示した各エネルギーの CO₂ 排出原単位を乗ずることにより、バイオマス、石炭 1MJ あたりの CO₂ 排出量を算出することができる (Fig. 6.2.1)。バイオマス 1MJ 製造する際の CO₂ 排出量は、0.0130 kg-CO₂/MJ-バイオマスとなる。石炭の製造時の CO₂ 排出量は、露天掘りと坑内掘りがそれぞれ 0.00053、0.00039 kg-CO₂/MJ-石炭で、これに燃焼時の CO₂ 排出量を加算すると、いずれも 0.091 kg-CO₂/MJ-石炭になる。なお、Fig. 6.2.2 で示したようにバイオマス燃焼時の CO₂ 排出量 (CO₂④) は森林に再び吸収されるものとした。

Table 6.3.1. Unit CO₂ Emission of Various Energy in Japan.

	CO ₂ Emission
Diesel Oil	0.0715 kg-CO ₂ /MJ
Heavy Oil	0.0746 kg-CO ₂ /MJ
Gasoline	0.0715 kg-CO ₂ /MJ
LNG	0.0516 kg-CO ₂ /MJ
Electricity	0.4378 kg-CO ₂ /kWh

6.3.2 バイオマス発電と他の発電の比較

バイオマスのエネルギー転換技術としてバイオマス発電を例に取り、他の発電技術（石炭火力、石油火力、LNG 火力、水力、海洋温度差、太陽光）と比較を行う。バイオマス発電の規模は、北アメリカ、インドネシア、ブラジルの植林地で 30 km 四方の植林を実施し、得られるバイオマス进行处理できる規模の発電プラントとした。Table 6.3.2 に各発電所の年間送電端発電量と発電所規模を示す。

各発電プラントの耐用年数を定め、発電所建設に伴う CO₂ 排出量と運用（燃料燃焼や保守修繕）に関わる CO₂ 排出量との和を総発電電力量で除することにより、各発電プラントの 1 kWh あたりの CO₂ 排出量を求めることが出来る。ここでは、耐用年数をすべて 30 年とした。それぞれの CO₂ 排出量を LCA により求めた結果を Table 6.3.3、Fig. 6.3.1 に示した。

バイオマス発電の設備は化石燃料による火力発電とほぼ同じ方式であるため、燃焼に際しての CO₂ 排出量を計上しないバイオマス発電の単位電力量あたりの CO₂ 排出量が、大幅に削減されている

ことがわかる。CO₂ 排出量に関しては、他の再生可能エネルギーを利用した発電とも十分に競争できる技術である。

Table 6.3.2. Plant Scale of Various Power Generation Station.

Type of Generation	Annual Generation [kWh/y]	Plant Scale [MW]	References
Coal Fired	6.08×10^9	1000	Uchiyama et al., 1991
Oil Fired	6.17×10^9	1000	Uchiyama et al., 1991
LNG Fired	6.34×10^9	1000	Uchiyama et al., 1991
Hydropower	3.93×10^7	10	Resources Council, 1983
OTEC (2.5MW)	8.76×10^6	2.5	Resources Council, 1983
OTEC (100MW)	5.70×10^8	100	Tahara et al., 1993
Photovoltaic (Indonesia)	1.18×10^7	10	Inaba et al., 1995
Photovoltaic (Japan)	8.64×10^6	10	Inaba et al., 1995
Biomass Fired (North America)	1.04×10^9	197	Tahara et al., 1998
Biomass Fired (Indonesia)	1.65×10^8	94	Tahara et al., 1998
Biomass Fired (Brazil)	5.98×10^8	114	Tahara et al., 1998

Table 6.3.3. Unit CO₂ Emission of Various Power Generation.

Type of Generation	Unit CO ₂ Emission [kg-CO ₂ /kWh]
Coal Fired	0.916
Oil Fired	0.756
LNG Fired	0.563
Hydropower	0.017
OTEC (2.5MW)	0.119
OTEC (100MW)	0.014
Photovoltaic (Indonesia)	0.148
Photovoltaic (Japan)	0.187
Biomass Fired (North America)	0.081
Biomass Fired (Indonesia)	0.119
Biomass Fired (Brazil)	0.024

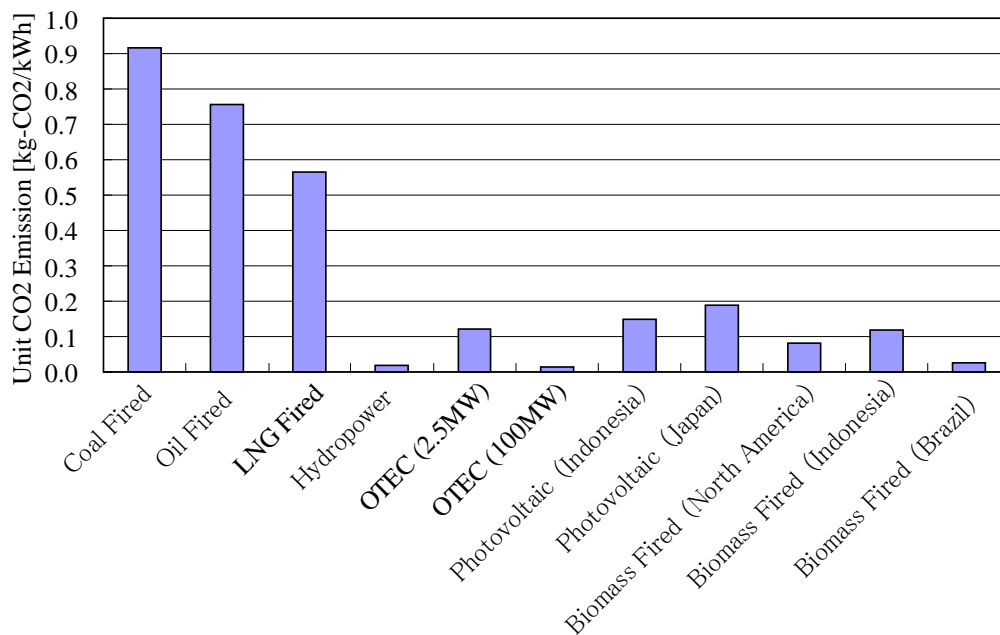


Fig.6.3.1 Unit CO2 Emission of Various Power Generation

6.3.3 バイオマスの環境影響

バイオマスの環境影響に関しては、CO₂ 排出量が着目されることが多いが、バイオマス生産時における CH₄、N₂O といった温室効果ガスの排出も考慮することが必要である。バイオマス生産による土地利用についても環境影響として考慮することが必要である。また栽培型のバイオマスの場合には食糧との競合についても派生的な環境影響として考慮することが必要となる可能性があることを付記しておく。

参考文献

- Tahara, K. et al. “Evaluation of generation plant by LCA- Calculation of CO2 payback time “, Chemical Engineering, 23(1), pp.88-94, 1997 (in Japanese)
- Uchiyama, Y. and H. Yamamoto, “Impact of Generation Plant on Global Warming”, Central Res. Inst. of Electric Power Industry report Y91005, 1992 (in Japanese)
- Science and Technology Agency resource survey society, “Natural energy and generation technology”, Taisei Publishing co. Ltd, 1983 (in Japanese)
- Tahara, K. et al., “Role of ocean thermal energy conversion in the issue of carbon dioxide”, Macro Review, 6, pp.35-43, 1993 (in Japanese)
- Inaba, A, et al, “Life cycle assessment of photovoltaic power generation system, Energy and Resources”, 16(5), pp.525-531, 1995

Tahara, K., et al. "Life Cycle Assessment of Biomass power Generation with Sustainable Forestry System" 4th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-4) 1998, 9, Interlaken, Switzerland

6.4 バイオエネルギーの経済性評価

6.4.1 バイオエネルギーのコストとは

バイオエネルギーのコストは、大まかにいって、原料であるバイオマス資源のコスト、資源をエネルギーに転換するバイオマス利用技術のコスト、消費者が利用できるバイオエネルギーのコスト（二次エネルギー価格）の3段階に分類することができる。

バイオマス資源のコストには、資源そのもののコストだけでなく、原材料や食料の用途に使用可能なことで発生する機会費用や、適切な処分をする必要があるために発生する廃棄費用、バイオマス生産に伴う環境変化による環境費用などを考慮する必要がある。

利用技術のコストに関しては、異なる種類のバイオマスをどの二次エネルギーにするかによって適切な利用技術が変わること、利用技術のコストや効率を現時点で評価するのか将来の技術開発を見込んで評価するのか、などにより想定が変わる。

バイオマス資源をエネルギー転換して電気や熱、液体燃料に加工した二次エネルギーの価格は、バイオマス資源のコストと利用技術のコストを組み合わせることで計算される。競合するエネルギーの状況をよく観察し、適切に比較しながら、個々のバイオエネルギーの利用開発が有望かどうか、常に冷静に確認する必要がある。

6.4.2 バイオマス資源のコスト

バイオマス資源には、木材や食料、エネルギー用途に特化したバイオエネルギー作物、そしてバイオマスを利用するプロセスで発生する残渣バイオマスがある。木材や食料をバイオエネルギー資源として利用する場合には、原材料や食料の用途に使用しないことによる機会費用の発生を考慮する必要がある。バイオエネルギー作物には、モノカルチャーとして工場のように生産する機会が多いため、持続可能な形で行われているか、環境影響はないかによって環境コストを計上する必要がある。残渣バイオマスは、特にエネルギー利用しなくても何らかの方法で適切に廃棄物処理する必要があるため、エネルギー利用することで廃棄費用を回避することができる場合がある。

これらを考慮してバイオマス資源コストを以下のように求めることができる。

$$(\text{バイオマス資源コスト}) = (\text{供給コスト}) + (\text{機会費用}) - (\text{廃棄費用}) + (\text{環境費用})$$

実際のコストを推計すると、資源としての品質が高く、機会費用の大きい新型燃料用丸太（木材チップ）のコストが高い。また、かさばり輸送・保管費用の高い穀物収穫時残さのコストが高い。そして、供給コストの必要なエネルギー作物のコストが高い。工場で発生したりごみ処理を前提とするために公共輸送されるバイオマス資源は、場合によっては負のコストでエネルギー利用が可能である。

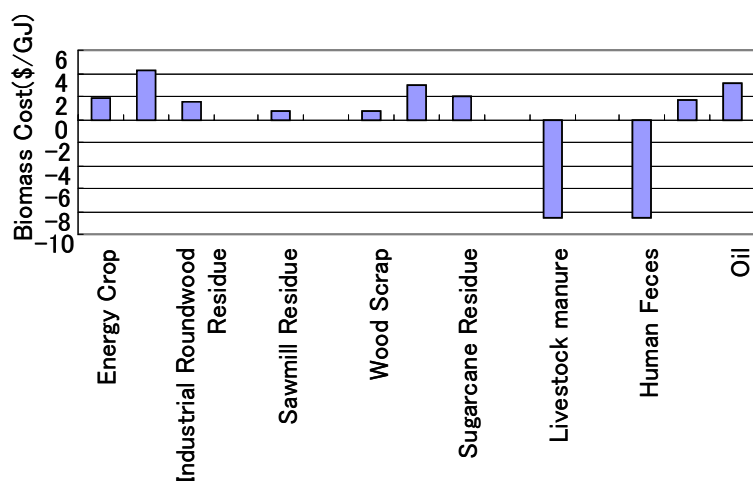


Fig. 6.4.1 Biomass Cost.

6.4.3 バイオマス利用技術のコスト

在来型のバイオエネルギーは、薪や木炭など固体燃料の形態で最終消費されるのに対して、新型のバイオエネルギーは、発電、液体燃料、気体燃料など、より利用しやすい形態に変換されて最終消費される。具体的には、発電（蒸気発電、ガス化複合発電）、熱分解ガス化メタノール合成、微生物利用の発酵技術（嫌気性消化発電、エタノール発酵）などがある。

たとえば、バイオマスガス化複合発電の発電コストは次のように推計した。文献(DeMeo 1997)によれば、設備費は1997年に2102 \$/kWe（設備容量75 MWe、発電効率36%）、2000年に1892 \$/kWe（設備容量100 MWe、発電効率37%）、2030年に1111\$/kWe（設備容量110 MWe、発電効率45%）と予想されている（いずれも1996年価格）。ただし、バイオマスガス化複合発電は、2001年現在でも実証段階に留まっており、1997年と2000年の設備費・発電効率は実現されていない。また、文献(OECD 1998)では、設備費を1221 \$/kWe（1990年換算、設備容量100 MWe）と試算した例もある。

また、設備費に対する年経費率（年間にかかる設備費や運転費の割合）については文献(OECD 1998)を参考に12%/年と仮定した。

そのほかのバイオマス利用技術のコストについてもそれぞれ推計し、算出エネルギーあたりのコストで比較した結果を図に示す。これによると嫌気性消化発電のコストが高いが、通常、家畜ふん尿などの廃棄費用によるマイナス分を含めれば、幾分緩和される。蒸気発電、ガス化複合発電、熱分解ガス化メタノール合成に関しては、プラントコストの低減を見込んでいるが、技術開発の不確実性がある。混焼発電のコストは、既存石炭発電プラントの改造コストであり、新たに発電設備を建設するわけではないので、他との単純な比較はできない。

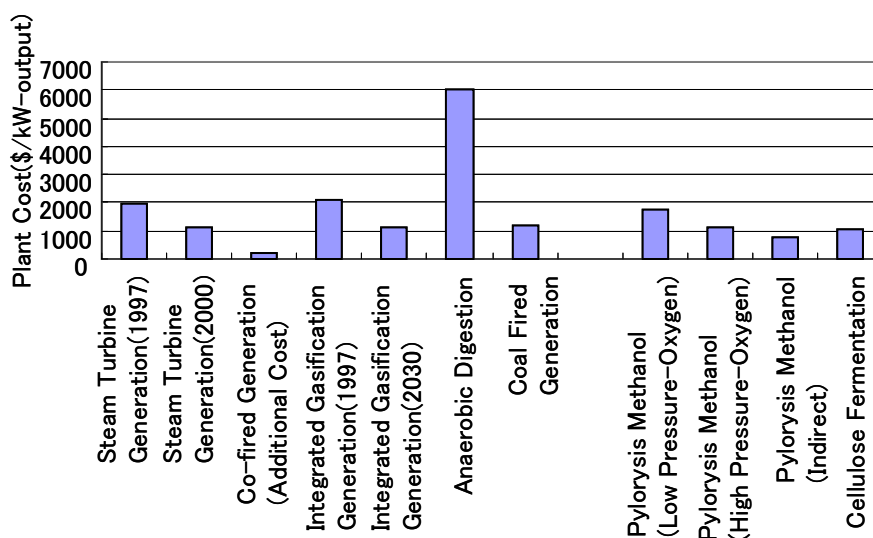


Fig. 6.4.2 Plant Cost.

6.4.4 バイオエネルギーの利用コスト

バイオマス資源をエネルギー転換して電気や熱、液体燃料に加工した二次エネルギーの価格を計算した結果を図に示す。なお、設備コストは、利率5%、寿命30年（合成燃料生産および嫌気性消化発電は20年）、年経費率を12%（嫌気性消化発電10%、熱分解ガス化メタノール合成17%、エタノール発酵27%）で年コストに換算した。

その結果、発電に関しては、将来開発が順調に進めばガス化複合発電が有望なことがわかった。一方、液体燃料に関しては、熱分解ガス化メタノール合成技術のコスト低減が期待される。なお、各種技術開発には大きな不確実性が伴うため、実利用にあたっては常に最新の数値を元にした分析を行うことが必要である。

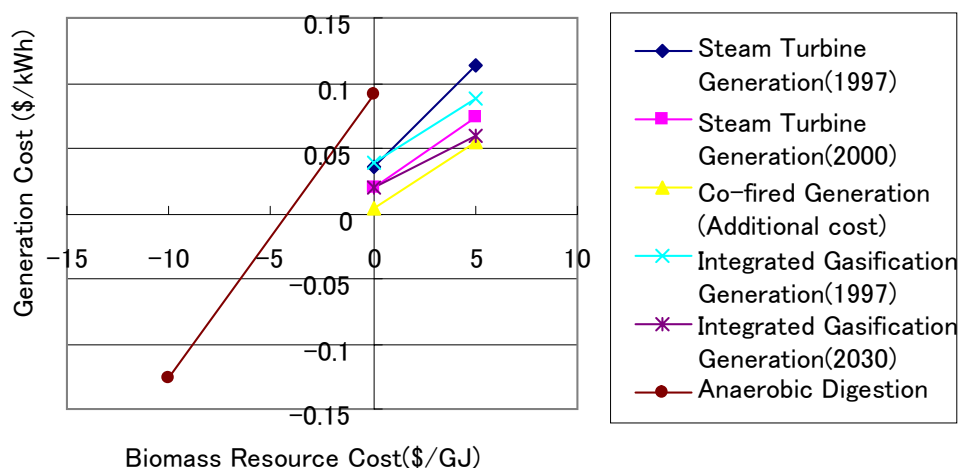


Fig 6.4.3 Biomass Cost (Generation).

参考文献

- Yamamoto, H., et al., "Economic Analysis of Bioenergy Utilization Technologies", The 18th Energy Systems, Economics, and Environmental Conference, pp.233-238, 2002 (in Japanese)
- DeMeo, E.A., "Renewable energy technology characterizations", Technical Report TR-109496, Electric Power Research Institute (EPRI) and U.S. Department of Energy, 1997
- OECD, "Projected cost of generating electricity update 1998", 1998

6.5 その他の評価

6.5.1 生活の質

発展途上国経済においては農業が非常に重要な産業であるため、持続可能な農業が農民生活の質や彼らの収入の向上につながることを望ましい。本項では、タイの農村地域における小規模メタン発酵を例として取り上げる。ある小さな農場では、嫌気性消化の原料として家畜糞尿を利用していた。具体的には、5頭の乳牛の糞尿である。産出されるバイオガスは、調理に使用されていた。その量は1日3回、計1時間の調理時間に使用するのに十分であった。この点においては、農民が家畜糞尿を自分たちの農場内で使用し、生産物であるバイオガスも自分たちのために利用できるため、この小規模メタン発酵は望ましいシステムと考えられる。また、発酵残渣を堆肥として再利用することは、結果として化学肥料の使用量の削減につながる。タイの農民にとっては、持続可能でない化学肥料の利用が通常であることから、このメタン発酵プラントから産出される堆肥の利用は持続可能な農業に転換する一助になる。つまり、このプラントは家畜糞尿に関して、エネルギー（バイ

オガス) とマテリアル (堆肥) として地域内リサイクルを実現していたといえる。この小規模メタン発酵プラントのもう一つの利点として、農民の衛生状態が改善したことが挙げられる。プラント導入後、ハエの数が減少したのである。

2006年に調査したこのプラントは、この地域で稼動している唯一のものであり、他には2基が建設中であった (Fig.



Fig. 6.5.1. Fermentation reactor under construction.

6.5.1)。これは、この技術が農民に広まっていないことによるものであり、調査時のタイ専門家との議論の中でも、教育が重要であることが指摘されていた。タイの農村地域では、識字率がよくはない。実際、調査したプラントは、近隣住民にメタン発酵の有効性を示すための、地元自治体の完全支援によるデモンストレーションを目的としたものであった。したがって、技術に関して適切な情報を農民に提供することが重要である。

バイオマス利用が農民にとって有効であるために重要なことは、バイオマスプラントや原料を確保できる場所にアクセスしやすいことである。仮に農民がバイオマス原料を所有していたり生産したりしていても、それらを利用できる場所にアクセスする手段がなければ意味がないからである。

6.5.2 農民の収入

上記のプラントを使用することで、農民はプロパンガスに支払っていた1ヶ月あたり350バーツを節約することができる (100バーツ=2.85 USドル、2006年12月現在)。これは農民世帯にとってかなりの額であり、この費用を減らせたことで彼らは幸せだと言っていた。発酵残渣は30kg入りの袋に詰められ、1袋あたり12バーツの収入を得ていた。このシステムは極めて単純で、村民の協力により9日間で作ることができる。材料費が5,000バーツ、総費用7,400バーツから、費用回収期間は21.1ヶ月となる。建設時にはノウハウのわかる地元自治体の職員が農民を支援する。プロセスを経済性のあるものに行っているものは、単純な構造と村の中でお互いに助け合う無償の労働力である。材料費は安く、運転に特別な技術は不要で、運転の主体は農民自身であるため、労務費を減らすことができる。つまり、プラントの構造の単純さが運転人員や労務費を削減するとともに、農民たちが自らの手で建設することを可能にしている。

ところで、タイのとあるエタノール製造プラント周辺に住む農民の収入について考えてみたい (Fig. 6.5.2)。このプラントは、新たに 10 万リットル/日の能力をもつエタノールプラントの建設を計画しており、その原料としてはキャッサバを考えている。その理由は、キャッサバの市場価格が廃糖蜜に比べ安定しているためである。従来このプラントが廃糖蜜を原料としていたため、



Fig. 6.5.2. Ethanol production plant in Thailand.

農民は収入を得ることができなかった。しかし、キャッサバからのエタノール生産を増やすことで、キャッサバ栽培がより魅力的なものになり、農村に人々が残るとプラントは考えている。キャッサバの単価は 3.7 バーツ/kg で、プラントに売却するための前処理として、粉碎し含水率 18%まで乾燥する必要がある。これを考慮しても、農民は 1 kg あたり 1 バーツという極めて魅力的な利益を得ることができる。

農民を支援するには、主に 2 つの方法があると考えられる。1 つは便利なエネルギー源へアクセスできるように、エネルギーを供給することである。タイでは小規模メタン発酵が農民に調理用ガスを供給し、それがプロパンガスの節約につながっている。このサポートは化石燃料の使用量の削減にもつながるため、持続可能な農業のためにも有効である。もう 1 つのサポートは現金である。農民がエタノールの原料としてキャッサバを栽培し、それをより高い価格で販売すれば、電力を購入するための現金を得ることができる。一般にエタノール燃料を使用する層は農民に比べて裕福であると考えられるため、このメカニズムは‘富の再分配’とみなすこともできる。

6.5.3 エネルギーセキュリティと外貨獲得

バイオエネルギー生産は、国内のエネルギーセキュリティの向上につながることを期待されている。一方、発展途上国にとってバイオエネルギーの輸出は、外貨獲得のためのチャンスでもある。ここでは、タイ政府によるバイオエネルギー生産へのかかわりを簡単に紹介したい。

2006 年 12 月の時点で、タイにおけるエタノールの単価は 23.50 バーツ/L であったが、これはエネルギー省によって定められたものであった。タイでは、6 つの工場がキャッサバからのエタノール燃料生産の承認を受けているが、その生産能力の合計は年間 7 億 200 万 L であり、年間 413 万トンのキャッサバが必要となる。タイはアジア最大のキャッサバ輸出国であり、年平均生産量は

2000 万トンである。800 万トンは国内でデンプンとして消費され、800 万トンはキャッサバとして輸出されるため、残りの 400 万トンをエタノールに割り当てることができる。したがって、現時点でキャッサバ生産は、食糧とエタノールの間でバランスしている。キャッサバの栽培面積は約 100 万 ha、政府は農地の拡大を禁じているが、政府の許可があれば農民は栽培作物を転換することができる。今後エタノールのためのキャッサバ生産は増加すると考えられるが、その一方でバイオエネルギー利用と食糧生産との競合がしばしば指摘される。つまり、国際的なエタノール需要が国内の食糧の安定供給を脅かす可能性があるということである。将来的なキャッサバの用途は、注意深く決定する必要がある。さらに、かつてキャッサバの市場価格が大暴落したこともあることから、農民に対する政府の財政支援が必要となる場面も想定される。

参考文献

The Japan Institute of Energy. “Report on the Investigation and Technological Exchange Projects Concerning Sustainable Agriculture and Related Environmental Issues,” Entrusted by the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan (Fiscal year of 2006) (2007)

6.6 持続性のためのシステム開発

6.6.1 生物多様性（パームオイルを例として）

(a) パームオイル生産の概要

現在、バイオマス利用に関して最も緊急かつ深刻な生物多様性への脅威は、マレーシア、インドネシアにおけるパームオイル生産に係るものであろう。

世界のパームオイル生産量の約 85%が、マレーシア、インドネシア両国で占められている。マレーシアでは 1960 年代に大規模プランテーションが急激に造成され始め、インドネシアでは 1980 年代から最大の生産国になるという政府の方針で大規模な開発・生産が行なわれるようになった。1990 年から 2002 年にかけて、オイルパーム・プランテーション面積は、マレーシアで約 2 倍、インドネシアで 3 倍以上に増加している。

オイルパーム・プランテーションの開発には、搾油工場の操業上の理由から広大な土地が必要とされ（東南アジアの典型的なプランテーションは 1 万～2.5 万 ha 規模）、造成にあたり森林破壊が生じることも多い。1985 年から 2000 年までのマレーシアにおける森林減少の約 87%はオイルパー

ム・プランテーション開発によるものとされ、インドネシアでもオイルパーム・プランテーションの少なくとも7割は森林を開発したものだという指摘もある。さらに、国立公園などのバッファ・ゾーンや生態学的に価値の高い地域においてオイルパーム・プランテーションの拡大が生じている。

(b) パームオイル生産と生物多様性

オイルパームの栽培地は、地球上で最も生物多様性が高いと言われる低地熱帯雨林の分布地と重なっており、主要栽培地は「地球規模での生物多様性が高いにも関わらず、破壊の危機に瀕している地域」であるホットスポットに位置している。同地域は、オラウータン、スマトラトラ、ボルネオゾウ、サイ、マレーバクなど絶滅に瀕している大型哺乳動物の残り少ない生息域でもあり、オイルパーム・プランテーション開発は、東南アジアの希少となった熱帯雨林への最大の脅威となっている。

熱帯林がプランテーション開発されると、8割～10割の哺乳動物・爬虫類、鳥類が消失するとされている。三浦らの調査によれば、自然林あるいは二次林では400以上の野生動物が見られたが、皆伐されパームオイル一種のみ植栽されたプランテーション開発後には、10以下まで減っている（下図参照）。

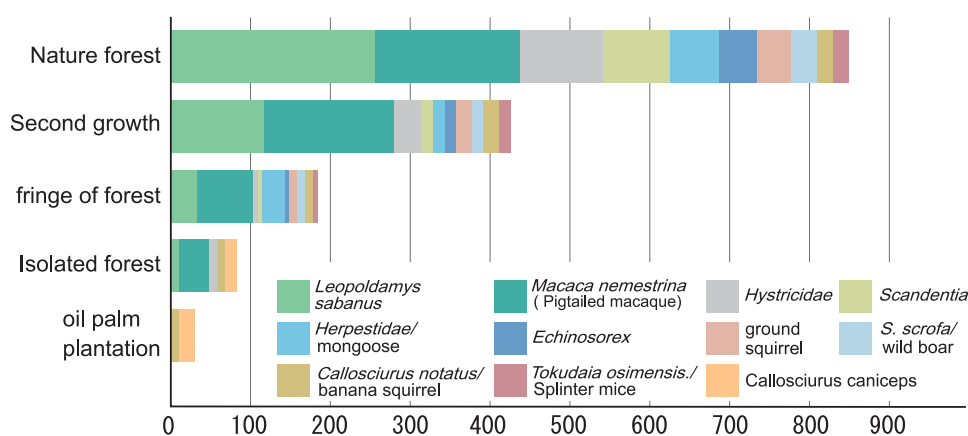


Fig. 6.6.1. Comparison of the appearance frequency of the wild animal used an automatic imager (in Malaysia)

(c) パームオイル生産によるその他のインパクトなど

インドネシアでは違法伐採への取り締まりが強化される中で、オイルパーム・プランテーション開発の目的であれば伐採許可が出やすいため、違法伐採の名目として利用されることもある。さらに、違法にもかかわらず頻繁に開発時に火入れが行なわれ、泥炭層が延焼し、広大な面積が消失して生態系に多大な影響を及ぼすと同時に、日本のCO2総排出量を越える年平均20億tのCO2が発

生し、気候変動への重大な脅威となっている。

なお、オイルパーム・プランテーション開発は、生物多様性消失以外にも、地元住民の権利の侵害や、森林に依存している先住民等の経済・文化への影響、社会の不安定化などをもたらしているケースがある。さらに、プランテーション操業の際には、農薬と化学肥料による土壌や河川の汚染、土壌浸食や、低賃金、農薬被害、児童労働、不法就労などの労働問題、廃液および残渣による水質汚染やメタンガス発生などが問題となっている。

6.6.2 土地利用競合

人類のバイオマス利用には資源的な限界が見え始めており、食料・原材料・エネルギーなどのバイオマス用途間の競合と、それに伴って、農地・牧草地・森林・居住地などの土地利用競合が激化することが予想される。

(a) 森林・耕地・牧草地・その他土地の競合

森林は人類活動によって減少してきた。世界の森林面積は、1700年から現在までに12億ha減少した。特に、北アフリカ・中東、中国の森林面積は半分以上に減少した。同じ期間に、世界の耕地面積は12億ha増加した。同じ期間の草地面積は0.7億haの減少で、変化は少なかった。このように、歴史的に見ると、森林破壊の主な原因は耕地化であり、逆に言うと、森林破壊の転用先は主に耕地だった。

1950年以降の土地利用変化を見ると、先進地域では森林の破壊は止まっており、西欧や北米では森林増加に転じている。一方、熱帯地域、中国、中東などの途上地域では森林破壊が続いている。その原因は、農地・牧草地への転換、非持続的な焼き畑による土壌劣化などである。途上地域の森林破壊は、地域的な環境破壊だけでなく、世界的なCO₂の排出源として問題になっている。

さらに、日本、韓国、台湾など一人あたりの耕地面積が少なく工業化の急速に進んだ地域では、耕地が減少している。この主な原因は、人口増と工業化に伴う居住地などの需要の増加、および、農業の国際競争力が劣ることである。日本では、1976年から1991年の15年間に耕地面積が5.0Mhaから4.6Mhaへ10%減少した。韓国でも同期間に6.6%減少した。

(b) 食料生産とエネルギー生産の競合

耕地では食料の他にエネルギー作物も生産可能である。耕地における食料生産に余力のある米国、ブラジル等では、余剰耕地を休耕するよりも、余剰耕地をバイオエネルギー生産に用いることが可能である。

特に、2006-2007年時点では、原油価格の高騰のため、主に食料供給に余裕がある地域で、エネ

ルギー作物を生産し、エネルギー作物から輸送用燃料を生産している。米国ではトウモロコシからのバイオエタノール生産が盛んである。ブラジルではサトウキビからのバイオエタノール生産が盛んである。そのほかに、菜種油やパーム油からの BDF 生産も行われている。

有限な耕地面積の中で、耕地をエネルギー作物に利用すると、食料生産可能な耕地面積が減少する。大規模なエネルギー作物の生産により、食料不足が生じる可能性も指摘されている。

参考文献

BIN (Biomass Industry Network) et al., “Bio-nenryo Riyo ni kansuru Kyodo Teigen”, 2007 (in Japanese)

The Japan Institute of Energy, “Biomass Yogo Jiten”, Ohmsha, 2004 (in Japanese)

Yamaji, K. et al., “Bioenergy”, Myosin Shuppan, 2000 (in Japanese)

6.7 エネルギーモデル

6.7.1 エネルギーモデルとは

エネルギーモデルとはエネルギーシステムを数理モデルで表現したものである。エネルギーモデルを用いて、環境制約を満たした上で、経済的に最適なエネルギー構成やエネルギーの将来像を分析可能である。エネルギーモデルは、シミュレーション型と最適化型に大別される。シミュレーション型とは、初期状態と人口や経済成長率等の各種の外生仮定から、演繹的に将来のエネルギーシステム構成を組み立てるものである。最適化型とは、初期条件に加えて、エネルギー資源量や利用技術などの各種の条件を制約条件として与えた上で、システム評価の基準を設定してもっとも望ましいエネルギーシステムを導出するものである。

6.7.2 代表的なエネルギーモデル

エネルギー・環境領域の政策研究へ適用されるエネルギーモデルの開発は、原子力のように長期的な計画を必要とする一国の特定のエネルギー技術評価から始まり、近年では地球温暖化対策評価のように地球規模での超長期対策を解析評価する大規模モデルへと展開している。

第一次石油危機後には、石油需給や脱石油のためのエネルギー技術開発に関する政策の解析を中心とするエネルギーモデルが数多く作成された。

最近、エネルギーモデル解析が特に活発に適用されているのは、1980年代後半からの地球温暖化問題である。地球温暖化対策評価を主目的として開発されたエネルギー環境モデルの最初のもは Edmonds-Reilly モデルである。わが国でも国立環境研究所が開発した AIM モデルや、わが国政府が 1990 年に発表した「地球再生計画」の数量的検討を目的として開発された DNE21 モデルなどがよく知られている。バイオマスのエネルギー利用に関するモデル分析を目的としたものとして、バイオマスバランス表に基づき、土地利用も含めて分析する GLUE モデルがある。

6.7.3 DNE21 モデル

DNE21 モデルとは地球温暖化対策技術の評価のために開発された最適化型の世界エネルギーモデルである。わが国政府が 1990 年に発表した「地球再生計画」の数量的検討を目的として開発された New Earth 21 (NE21) モデルをもとにする。NE21 モデルに時間範囲を拡張し動学化するなどの改良を加えたものである。

世界を 10 地域に分割し、2100 年までを対象として、現在価値換算した総費用を最小化するエネルギーシステムの姿を描く。東京大学で開発されたモデルであるが、地球環境産業技術研究機構 (RITE) など地域細分化などの改良が進められ、バイオエネルギー技術も詳細に扱うことができる。

6.7.4 GLUE モデル

世界土地利用エネルギーモデル(global land use and energy model) の略で、わが国で開発された。世界を対象に、現在及び将来のバイオマス供給可能量を評価する代表的なシミュレーション型のモデルである。

人口と一人あたり食糧需要などから求めたバイオマス需要と穀物単収などのバイオマス供給から、土地利用競合を考慮した余剰耕地面積と、そこから生産可能なエネルギー作物の供給可能量を計算する。同時に、生産、加工、消費、廃棄、リサイクルなどのバイオマスフローの定量的評価から、フローの過程で発生するバイオマス残さのエネルギー利用可能量を計算する。

最近是最適化型のバージョンも開発され、バイオマス資源量だけでなく、バイオエネルギー利用技術の評価も可能である。

6.7.5 GLUE モデルにおける土地利用競合の扱い

GLUE モデルにおいては、人口と一人あたり食糧需要などから求めたバイオマス需要と穀物単収と耕地面積などのバイオマス供給から、土地利用競合を考慮した余剰耕地面積を計算する。具体的に

は以下の通りである。動物性食料需要のうち、魚介類と牧草から生産される肉類を除いて、穀物から生産される動物性食料需要と肉類用の穀物需要を求める。肉類用途穀物需要と植物性食料用の穀物需要を合計して、穀物需要を求める。穀物需要を穀物単収で割って、穀物用耕地面積需要を求める。穀物用耕地面積から穀物用耕地面積需要を差し引いた面積を余剰耕地面積として、そこからエネルギー作物が生産可能とする。もし、穀物用耕地面積が穀物用耕地面積需要よりも小さければ、食料不足になる。このとき、総カロリー供給を大きくするため、植物性食料の供給を動物性食料の供給よりも優先すると仮定する。

参考文献

The Japan Institute of Energy, “Biomass Yogo Jiten”, Ohmsha, 2004 (in Japanese)

第7部 アジア諸国の現状

7.1 中華人民共和国

7.1.1 背景

急速な経済発展と共に、中国でもエネルギー需要が急速に増大している。中国の総エネルギー消費は既に世界第2位となっている。図1は、1990～2006年の中国の石油消費および純輸入の傾向を示している。中国が石油の純輸入国となった1993年以降、石油の輸入依存は1995年の7.6%から2006年の47.0%へと増大した。2020年には、中国での石油消費および輸入はそれぞれ450百万トンおよび250百万トンに上ると予測されており、石油の輸入依存は55%である。将来、輸送用燃料の消費に伸びの大部分に資すると期待される。総石油消費の約1/3である2000年の輸送用燃料の消費と比較して、2010年および2020年までには比率はそれぞれ43%および57%に上昇すると予想される。

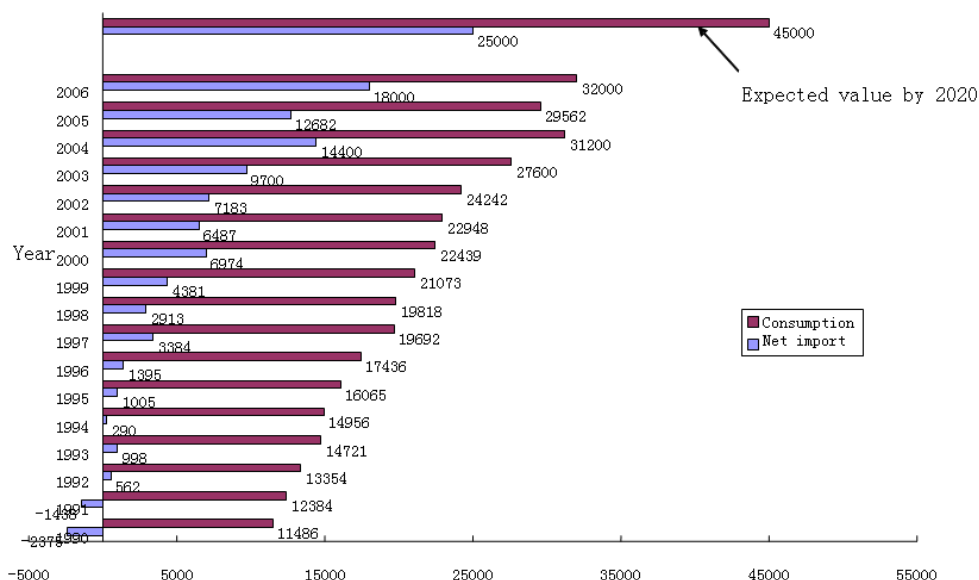


Fig. 7.1.1. Trends of China's oil consumption and net imports from 1990 to 2006.

7.1.2 中国でのバイオ燃料開発の状況

不十分な燃料供給と省エネ及び汚染物質排出低減の要件のため、中国政府はバイオ燃料の研究開発に益々注意を払っている。中華人民共和国再生可能エネルギー法は、2005年に公布された。

中国では、2001年にエタノールガソリン計画が開始された。食品ベースのエタノール燃料を生産する許可を政府から得ているのはわずか4つの工場である。政府支援は、中国でのエタノールガソリン開発のシミュレーション、特に刺激策などの優遇政策によるエタノールガソリン実証の初期段階において重要な役割を果たしている。刺激策は次のとおりである。1) 変性エタノール燃料の消費税(5%)は無料である。2) 変性エタノール燃料の付加価値税がまず課税され、その後エタノール供給業者へ戻される。3) 調合業者でもある石油会社へ販売される変性エタノール燃料の価格は、 $(0.9111 \times 90\#ガソリンのメーカー価格)$ である。一方、すべての種類のE10(90#、93#または97#)の市場価格は90#、93#または97#ガソリンと同じである。4) 手当がエタノール供給業者へ支払われる。これらの刺激策は2008年までに実施される。現在、エタノールガソリンは9つの省で使用されており、総消費量は2006年には1.54百万トンであった。しかし、食品の安全を保証するため、これ以上の食品ベースのエタノール燃料工場が中国政府により許可されることはない。将来、キャッサバ、甘薯、甘とうもろこし、およびリグノセルロースなどの非食品原料油がエタノール燃料生産の原料となる可能性がある。広西省で原料油としてキャッサバによる200,000トン/年のエタノール燃料工場が政府により許可されており、すぐに操業開始することが期待されている。4つの既存のエタノール燃料工場も、非食品原料油を使用するよう奨励されている。

中国には10か所を超えるバイオディーゼル油工場がある。生産量は約100,000トン/年である。2007年5月に「ディーゼルエンジン燃料用バイオディーゼル調合備蓄法(BD100)」が公布された。しかし、エタノール燃料のようなバイオディーゼル油販売用の正規の政策はまだない。ある種のバイオディーゼル油はエンジン以外に使用される。現在、中国でのバイオディーゼル油開発の問題は原料油供給である。中国は、毎年6百万トンを超える食用油の輸入を必要としている。バイオディーゼル油生産に大豆油や菜種油などの食用油を使用することは不可能である。現在、中国でのバイオディーゼル油工場の大部分は原料油として廃油を使用している。しかし、バイオディーゼル油の開発と共に、廃油価格は益々上昇している。木材油が益々注目を引いている。「国家バイオエネルギー指向森林建設計画」および「第11回5カ年計画での木材原料油生成計画」が中国の国家森林管理局により公布されており、これは400,000ヘクタールの *Jatropha curcas* が雲南省、四川省、貴州省、および重慶市で、250,000ヘクタールの *Pistacia Chinensis* が湖北省、山西省、安徽省、および河南省で、50,000ヘクタールの *Cornus Wilsoniana* が湖南省、湖北省、および江西省で、133,333

ヘクターの *Xanthoceras Sorbifolia* が内蒙古、遼寧省、および新疆で栽培されることを示している。

7.1.3 結論

急速な経済発展に伴い、エネルギー供給の大きな不足が中国の持続可能な発展の「ボトルネック」となっている。現在、解決すべき重要な課題は、資源および環境の圧力を軽減するためバイオマスエネルギーの開発を加速することである。さらに、責任ある国家として、中国はエネルギーを節減し汚染排出を低減するために国際的責任をとる必要がある。したがって、バイオマスエネルギー産業は中国でかなり明るい未来を約束している。現在、バイオマスエネルギー消費量は総燃料消費量の8%である。2007年9月4日に公布された「再生可能エネルギーの中長期開発計画」によれば、バイオマスエネルギー消費量の割合は2010年までに10%へ、2020年までに15%へ増大する。2010年までに、中国での非穀物ベースの燃料エタノールの年間消費量は2百万トンに達し、バイオディーゼル油の年間消費量は200,000トンに達する。2020年までに、中国でのエタノール燃料の年間消費量10百万トンに達し、バイオディーゼル油の年間消費量は2百万トンに達する。

7.2 大韓民国

7.2.1 韓国でのバイオマス資源量

韓国で利用可能な主なバイオマス資源は、有機廃棄物および農業と森林の残余物である。エネルギー利用のためのバイオマスの潜在的で回復可能な量を Table 7.2.1 に要約する。Table 7.2.1 のデータに従って、韓国で利用可能なバイオマス資源の総量は80百万トンであり、潜在的バイオマス資源のわずか30%が現在エネルギー生産に利用されている。

Table 7.2.1. Biomass resources in Korea.

Resources	Potential, x 10 ³ Mt/ year	Recoverable, x 10 ³ Mt/ year
Forest residues	7,830	1,300
Agricultural residues	16,000	4,900
Food waste	5,100	5,100
Municipal waste	1,600	260
Animal wastes	47,000	
Sludge	2,500	280
Total		

S. C. Park et al. (2007).

7.2.2 方針と義務

2002年に制定された新規および再生可能エネルギー促進法は、バイオエネルギーを再生可能エネルギーとして承認し、その実施を支援している。消費税の全額免除が、現在自動車燃料として使用されるバイオディーゼルに利用可能である。ディーゼルの現在の消費税は\$0.5/Lである。韓国のすべての精油所はディーゼル油製品に一定量のバイオディーゼルの混合する必要がある (Table 7.2.2)。

Table 7.2.2. Mandatory target for the biodiesel implementation (KMOCIE, 2007).

Year	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Biodiesel content in diesel, %	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0

7.2.3 目標

バイオエネルギーの場合、2002年に韓国の商工エネルギー省 (KMOCIE) により次の目標が設定された。(Table 7.2.3)

Table 7.2.3. Targets for bioenergy implementation in Korea.

Year	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Heat, x 10 ³ toe	236	277	283	472	477	483	489	679
Power, x GWh	1232	1848	2465	3081	3383	3697	4000	4313

7.2.4 他の活動

バイオディーゼル

韓国の大都市での深刻な大気汚染も輸送セクターでのバイオディーゼルの導入に一役買っている。その理由は、バイオディーゼル調合燃料が車両からの大気汚染物質の排出を低減させる可能性があるからである。ソウル都市部および全北州での BD20 の実証供給は 2002 年 5 月に開始され、2006 年 6 月に終了した。実証供給の時期に、BD20 の自動車燃料としての実現可能性、バイオディーゼル燃料仕様の作成、およびバイオディーゼル調合燃料用流通インフラの確立などの意見の分かれる課題を解決するためいくつかの重要な作業が実施された。1 年間の作業後に、16 個の仕様パラメータを持つ規格の原案が作成された。規格で採用された数値は、実質的に欧州規格 EN14214 の数値と同じである。実際の車両隊の試験が、2 年間韓国のバイオディーゼル規格を満足するバイオディーゼルで作成した BD5 および BD20 に対して実施された。車両隊の試験を通じて、BD20 は乗用車には適していないことが発見された。同時に、BD5 の使用に問題は開発されなかった。したがって、KMOCIE は新しいバイオディーゼル流通システムを作成し、2006 年 7 月から施行した (Fig. 7.2.1)。新しい計画によれば、韓国のすべての精油所は年間 100,000 kl のバイオディーゼルの購入し、ディーゼル製品と混合し、調合済みディーゼルのすべてのガソリンスタンドへ供給する必要がある。その結果、韓国で販売されるすべてのディーゼル油は約 0.5% のバイオディーゼルを含んでいる。BD20 は、自分のガスポンプを持つ専属自動車隊のみへの供給が許可されている。

バイオディーゼル実施に対する韓国政府の強力な支援により、バイオディーゼルビジネスは活発になってきている。原料の安定供給は、重要な課題になりつつある。バイオディーゼル生産用の原料の安定供給を確保するため、さまざまな活動が進行中である。これらの活動には、国内でカノーラ油の量産の実現可能性を判断するための冬菜種の実証栽培および東南アジア諸国でのジャトロファ栽培が含まれる。

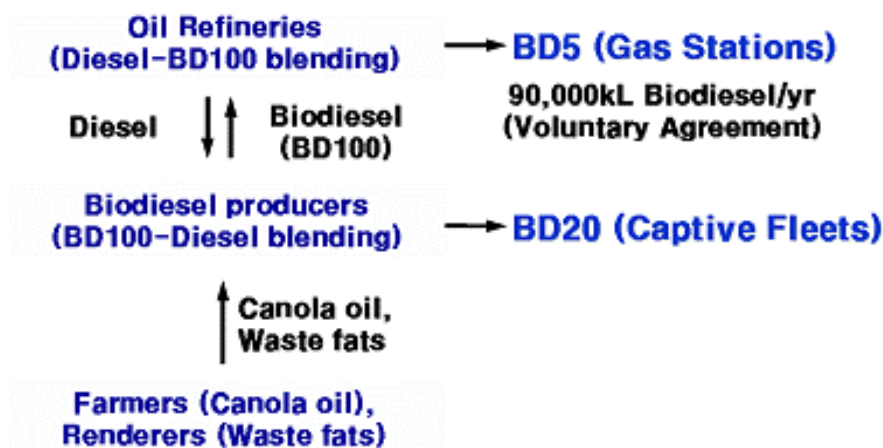


Fig. 7.2.1. New biodiesel distribution infra in Korea.

7.3 ミャンマー

ミャンマーの国土面積は 69 万平方キロメートル（日本の約 1.8 倍）で東南アジアの大陸部では最大である。人口 5200 万人で北部を除き大部分が熱帯モンスーン気候に属する。このため自然条件や生態および生物の多様性という点では特異かつ貴重な国である。米をはじめ森林資源や鉱物資源にも恵まれている。ただ、全就業人口の約 7 割が農業部門で GDP の 6 割を占め、工業部門は 1 割程度といわれている。政治的には第 2 次大戦後の一時期は民主体制にあったが 1996 年のクーデターにより国民議会が停止された。それ以後は軍政が続いており政治的には不透明で経済的な困難は解消されず世界の最貧国の一つともいわれる。バイオマス関連の実効ある法律は施行されていないが物不足や燃料不足の中にあるため廃棄物は何らかに利用されている。製材工場の残材は燃料として、家畜・食品廃棄物も肥料などに利用され余剰はでていない。逆にいえば貧困社会であるが故にバイオマス循環が非常によく行われている。

現地調査では籾殻の利用については興味深い事例が二つ認められた。電力不足とインフラの不備、化石燃料の不足などのため籾殻ボイラーにとドイツ製（1925 年）の蒸気ピストンエンジンが精米機を駆動していた（約 600 箇所）。ただし蒸気ボイラーの熱効率是非常に低く籾殻の消費が多いためその数は減少している。もう一つは最近普及しつつある籾殻ガス化炉とガスエンジンによる小型精米機の駆動である。ガス化炉は全て現地製でダウンドラフト式、上部から籾殻を投入し下部から灰を取り出すシステムである。その他の装置は水洗式スクラバー、フィルター、ガスエンジンを組合

せた現地製のものである。ガスエンジンは日本製のバスやトラックの中古ディーゼルエンジンを使っている。燃料噴射ノズルを点火栓に替えたものでガスエンジンの軸出力が 20–50 kW のものが多い。通常は籾殻 30 kg/h で 20 kW を発電する。この種のガス発電装置は 2000 年に約 100 台普及しており 2005 年には 300 台が普及していたと見込まれる。なお、ミャンマー商業省の傘下にある企業が中国政府の技術支援で製造する籾殻ガス化発電プラントは 140–160 kW の発電能力を持つと聞いた。形式はダウンドラフト、炉下部はジャケットによる水冷とし灰出し装置を持つものである。発生ガスは水洗スクラバーと冷却装置、ガス貯蔵タンクを経てガスエンジンに入る。パンフレットによるとこのシステムの価格は約 35 万円（ただし、現地の物価は日本の約 1/100）であった。この発生炉ガスの組成を表に示した。

Table 7.3.1 The composition of the gas produced from rice husk.

Carbon dioxide	12.6	%
Carbon monoxide	17.9	%
Nitrogen	57.0	%
Oxygen	0.9	%
Hydrogen	8.8	%
Methane	1.9	%
Others	0.9	%

ガス化炉の製造は従業員が数人の鉄工所で行っているが見たところ基本的な部品が標準化されており若干の在庫も認められた。ミャンマーでは未だ多くの規制があり、物不足・燃料不足のためバイオマス利用やその他の残渣は再利用をせざるを得ない状況といえる。砂糖工場で発生するバガスは自家発電に利用されており余剰はない。また籾殻はじめ薪炭など多方面で利用され廃棄物は発生していない。調査した民営の精米所は籾殻ボイラー・蒸気エンジンを効率の高いシステムに改善したいとの強い要望があった。

最近は限定的ながら経済自由化政策が行われ民営の精米所も少しずつ活発化している。電力や化石燃料の不足は続くと思われるため小型籾殻ガス化エンジンは精米機の駆動やその他の動力源として今後とも普及するとみられる。現在のところ特定のバイオ燃料の生産や普及が進む段階にはないが大きな国土面積と気候に恵まれ森林資源や資源作物の生産ポテンシャルは高い。したがって長期的にみればバイオエタノールやバイオディーゼルの生産でもマレーシアやインドネシアに劣らぬ潜在力をもつと考えられる。

バイオマス利活用の形態は与えられた自然条件や国々の社会・経済的な条件で大きく異なるため

木目細かな対応が必要になる。また、急速に変動する現地情報を収集するため大学などの中立機関を介したリエゾンオフィスなどの設置が望まれる。とくに将来は大学・学会・NPO・国際機関などが密接に連携した産学共同のネットワークを機能させることにより分散型バイオマスの利活用が進むのではなかろうか。

仏教国であるミャンマーは日本とも共通する感性と高い義務教育のレベル（就学率：96.56%、識字率：93.3%）を誇っている。ASEANメンバーでありながら経済発展に取り残された感のあるミャンマーであるがより開かれた民主国家として発展するため今後において日本の大学や学会ができる協力も多々あると思われる。

参考文献

- Myanmar Ministry of Information. Myanmar: Building a Modern State(2004)
- Myat Thein. Economic development of Myanmar, Institute of Southeast Asian Studies, Singapore(2004)
- San San Rice Husk Gasifier. San San Cooperative Ltd., No. 279, Shwegondine Road. BahanTownship, Yangon, Myanmar(2005)
- The paddy husk gas generating plant. Myanmar Agricultural Produce Trading(MAPT). Ministry of Commerce, Yangon Division, Mingalartaungnyunt Township, Yangon(2003)
- Makoto Hoki, Hideto Mashimo, “Tonan Ajia shokokuni okeru baiomasu riyono doko”, J. Jpn. Inst. Energy, submitted. (in Japanese)
- United Nations, Statistic Division, “Sekai tokei nenkan”, Hara Shobo (2005). (in Japanese)
- Shin-ichi Yano, “Ajiani okeru bioennryo seisan riyono tenboto sansokendeno seizo gijutu kaihatu”, Kankyo Gijutsu, 36(12), 7-12 (2007). (in Japanese)

7.4 ラオス

ラオスは560万の人口からなる山岳国であり、その80%が稲作を中心とした農業と林産物の収穫を基盤とした農村地域で生活している。経済発展はアジアで最も遅れており、国民一人あたりの国民総生産は約500米ドルである。

経済は主に農業、林業、発電、鉱業に立脚しており、国内総生産の42.2%が小規模産業と農業、31.5%が産業部門、サービス部門が31.5%を占め、輸出関連は0.9%である（2006年時点）。

ラオスは、発電のためのエネルギー資源に恵まれている。水力は最も豊富で、経済性の高い資源である。このような水力や石炭から、燃料用木材といった伝統的な資源まで様々である。森林は国土面積のおよそ 40%を占め、伝統的なエネルギー供給の実質的な役割を担っている。

ラオスの発電部門は順調に発展しており、2006 年には総人口の 54.1%が電力へアクセス可能なまでに至っている。しかし、ラオスのエネルギー消費は、依然として調理用の燃料用木材が中心である。

一般家庭の電化率を 2010 年に 70%、2020 年には 90%にするという政府目標の達成のために、政府は発電部門政策を次の通り掲げた。

1. ラオスの経済・社会発展を促進するため、安価で安定、そして持続可能な電力供給を維持し、拡大する。
2. 政府の発展目標を達成するために、外貨獲得を目的とした輸出用発電を推進する。
3. 電力開発の効率的な指示、容易化のために、法律・規制面の枠組みを開発・高度化する。
4. 責任の明確化を目的とした組織および組織構造の強化、商業機能の強化、そして管理機能の合理化を行う。

これらの目標・政策の達成のため、現在 50 以上の水力開発に関する覚書があり、その発電容量は 5~1080 MW にわたり、6 つのプロジェクトが建設中である。これらの計画が実現すれば、大量の木質廃棄物が発生し、処分が必要となることから、技術と資本があればバイオマスによるコージェネレーションが計画できる。

ラオスは化石燃料の 100%を輸入している。現在 3 つの企業が天然ガスおよび石油開発の調査を行っており、もし 10 年で生産のための情報がすべて集まれば、輸入を減らし、化石燃料消費の効率化を図ることが可能である。また、政府はナンヨウアブラギリとアブラヤシからのバイオディーゼルと、サトウキビからのバイオエタノールの生産を支援している。

政府がバイオ燃料利用の推進を宣言して以降、バイオディーゼル生産を目的としたナンヨウアブラギリの植林をビジネスとする企業が生まれ、その最も大きなものは Kolao Farm 社である。彼らの目標は植林面積 4 万 ha であり、工場はビエンチャンから 70 km の場所に現在建設中である。

2 番目に大きな企業は LaoBiodiesel 社であるが、植林面積はまだ 100 ha、2008 年 3 月 10 日に Champasak 県への工場の建設を開始したばかりである。

アブラヤシに投資する企業は二社ある。そのうち一社は Champasak 県に 25 ha の植林を 2006 年に始め、もう一社はやはり 2006 年に、Bolikhamsay 県に 20 ha の植林を始めたばかりである。

その他の企業は、ナンヨウアブラギリの小規模な植林を行う程度である。

ラオス・タイ間のエネルギー協力部門の下、タイのエネルギー省から実証試験のために、ナンヨウアブラギリからのバイオディーゼル生産施設の提供を受けた。

バイオディーゼルの推進は、バイオエタノールのそれよりも進んでいるが、これはバイオエタノールへの投資コストと技術が高額であることと、ラオスの現存する砂糖工場が小規模であることがその理由である。

ラオスにおけるバイオ燃料の推進に関する資料がまだ整備されていないことから、エネルギー・鉱業省の電力部門は、新エネルギー産業技術開発機構（NEDO）の設立を要求している。バンコクの代表部は、ラオスのバイオディーゼル利用を推進するための戦略・政策に関する調査研究を実施し、推進案をまとめることを目的とした、ラオス再生可能エネルギー研究所を設立するための資金を提供している。

政府目標は、バイオディーゼル生産によって化石燃料の消費量を5%削減することにある。

7.5 ブルネイ

7.5.1 ブルネイのバイオマス概論

ブルネイは石油や天然ガスなどの化石燃料資源を多く埋蔵しており、石油・天然ガスの輸出によりGDPのほぼ半分を獲得して、非常に経済は潤っている。したがって当面、バイオマス燃料を開発しようというインセンティブには乏しい。

その反面、国土面積が狭小（5,770km²）で農地が乏しく、食料品はそのほとんどを輸入している。そこで国家開発計画においては常に食糧自給率の向上を掲げている。しかし1984年の独立後、政府部門が急激に拡大し安定的な高報酬の雇用が得られるようになったため、農業者の離農が進行し、全般的に農業は停滞している。農業生産額がGDPに占める割合は2.7%に過ぎない。

7.5.2 ブルネイの自然条件

全土が熱帯気候下にある。熱帯雨林は国土の8割（4,690km²）を占める。その70%が原生林であり、さらにその半分が環境保護林である。国土は東西に分かれ東側、テンプロン川流域は、海岸付近を除きほとんどが未開発の密林で、広大な自然公園となっている。国民の大半は、西側の3つの地区に住んでいる。

ブルネイを含む東南アジアの農業における土地生産性は温帯地域に比べ低い。熱帯土壌は栄養塩類の溶脱が激しいため農業に向いていない。落葉や倒木などはすぐに菌類やシロアリなどで分解消費されてしまい、土壌には腐食質が蓄積しない。さらに熱と水の影響を受け、酸化アルミニウムと酸化鉄以外の土壌成分が速やかに溶脱してしまうために、土壌は非常にやせている。熱帯雨林では、森林生態系を支える栄養塩類を土壌にではなく樹木やその林冠部に着生した植物群落によって回収されてしまい、そのバイオマスとして保持される。

小規模農耕には、山岳部の照葉樹林地帯における陸稲や小規模な棚田における水稻栽培がある。短期的には森林バイオマスに捕捉された栄養塩類を注ぎ込むことができる焼き畑におけるイモ類栽培があるが、焼き畑農地では、主たる栄養塩類保持装置たる森林バイオマスを破壊してしまうため、その土壌は焼く2年で消耗し荒地化する。

溶脱した栄養塩類が集積する低湿地にはサゴヤシ栽培が可能である。低湿地には湿地林（スワンプ・フォレスト）が現れる。湿地林は樹高が低く、植生が1層のみなので明るい、土壌の酸素欠乏により腐植質の分解を妨げられ、泥炭が形成される。このため、開拓してもすぐに地表が沈みはじめ、沼池になり農地化できない。

沿岸部には、干潮時、満潮時に海水が浸入する汽水域に広がるマングローブ林が現れる。この林の土壌はマングローブの根が分泌する根酸のため、強い酸性となっている。焼き畑もできず、農業にとっては不毛の地であった。20世紀に至りようやく養魚に利用されるようになった。

7.5.3 ブルネイの政策

第7次5カ年計画(1996–2000年)では各種農産品の自給率の向上等を柱とする農業振興策を打ち出したが、食料自給率は20%の状態にあり、バイオマス燃料開発への余力までには、はるかに距離がある。

計画は、年々増大する食糧需要に対応するため、自然条件に合う栽培技術・生産システムの向上を目指し研究を行い、水耕栽培等の新技術の導入、農場の拡大を進めた。水耕栽培を普及推進には、必要な器具や肥料購入に半額補助をした。農業局は、2000年に新しい開墾地域を承認した。野菜(50ha)、果物(500ha)、家畜(100ha)の生産用である。

食糧自給への努力はかなりの成果を挙げている。2004年に鶏卵は1億個/年を越え、鶏も13百万羽に達してほぼ自給率100%を達成している（ただし飼料の大部分は輸入による）。しかし自給率は熱帯野菜53%、ミルク13%、牛肉3.8%、山羊3%、雑穀2%、米1%とまだ低く、本格的な農業生産の水準に達しているとはいえない。

7.5.4 特色あるバイオマス産物

サゴヤシ (sago palm, *Metroxylon sago*) はこの地域の特有の樹木である。農産物主成分であるデンプン質を大量に生産する。

サゴヤシ生育地は東南アジアからオセアニアに到る。ブルネイはセレベス島やモルッカ諸島とともに「サゴ区」に分類されている。これは主食炭水化物摂取量のうちサゴヤシの占める割合が数割を占める地域を意味する。

サゴヤシは、幹からデンプンが採取できる珍しい被子植物のヤシ科の植物である。植えてから16年、好条件の場合は10年経過すると開花と結実に備えて、直径40-60cm、高さ12-15mの「幹」を形成し、ここに高純度のデンプンを蓄え、このすべてを繁殖につぎ込み、種子を残して枯死する。そこで開花前のデンプン量が最大になった時点で伐採し、1m以内の長さに切断する。幹の「皮」は数cmあり、縦割りして内部の繊維質によって保持されたデンプン質の髄を取り出す。これをほぐしながら水で洗い流し、網などを通して繊維質を取り除き、最後に沈殿させる。このようにして成木1本あたり、含水物として300-500kg (乾物100-150kg) のデンプンが得られる。

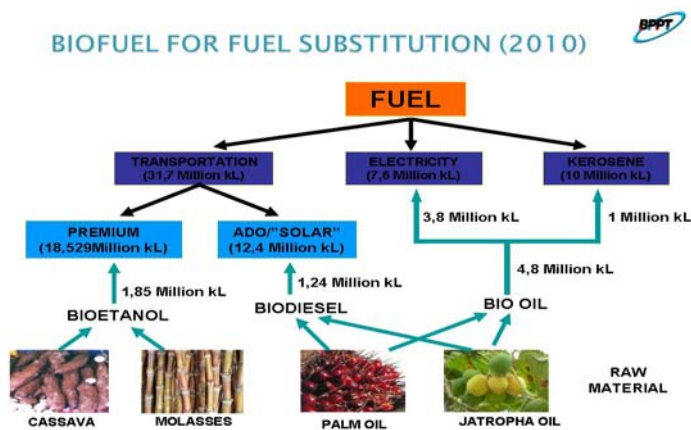
サゴヤシ農法の利点は、作業手順が容易で労力がかからずに大量のデンプンを生産できる農法とされていることにある。多くの植物が生育できない泥炭土壌で栽培でき、栽培によって土壌がより劣化しない。熱帯雨林沿岸部に最も適した作物だと言える。

サゴデンプンからエタノールをつくることは技術的に容易であるが、問題点は、この地域の食糧自給率が非常に低く、余剰バイオマスを生むことができない点にある。

参考文献

Sano,H.in "Biomass Handbook",Japan Institute of Energy Ed.,Ohm-sha,2002,p.37.(in Japanese)
"Baiomasu yogo jiten"、Japan Institute of Energy Ed.,2006,p.178.(in Japanese)

7.6 インドネシア



Source : Sony, 2007

Fig 7.6.1. Biofuel for fossil fuel substitution (2010)

インドネシアは、石油、天然ガス、石炭、水力、地熱、太陽光、バイオマスなどの広範な土地特有のエネルギー資源を持っている。しかし、インドネシアには現在までエネルギーミックスでの基本エネルギーの使用がまだアンバランスであるという問題がまだある。エネルギーミックスでの大部分の石油はまだ国内消費の約 52%を占めており、それに天然ガス、石炭、水力、および地熱が続いている。バイオ燃料自体の利用はまだ非常に少ない、最終エネルギー

ミックスのバランスをとり、エネルギーの最大の材料としての石油に替えるため、インドネシア政府は 2025 年にバイオ燃料を設定しており、バイオ燃料は国内エネルギーミックスの 5%以上に資すると期待されている。中期目標として、2010 年にバイオ燃料は家庭および商業セクター、輸送、および発電所セクターでのエネルギー源としての役割を果たすよう目標設定されている。バイオ燃料は、石油の役割の代用となる。それは図示されている (Fig. 7.6.1)。輸送セクターの場合、2010 年までにバイオエタノールの形態のバイオ燃料が 1.85 百万 kL の輸送エネルギーミックスに使用され、1.24 百万 kL のバイオディーゼルと 4.8 百万 kL のバイオオイルがそれぞれ使用される。同時に、輸送セクターのみでバイオ燃料の合計はエネルギーミックスの 10%に達する。家庭および商業セクターと発電所セクターでは、バイオ燃料はバイオケロシンおよびバイオオイルまたは純粋な栽培油の形態で利用される。

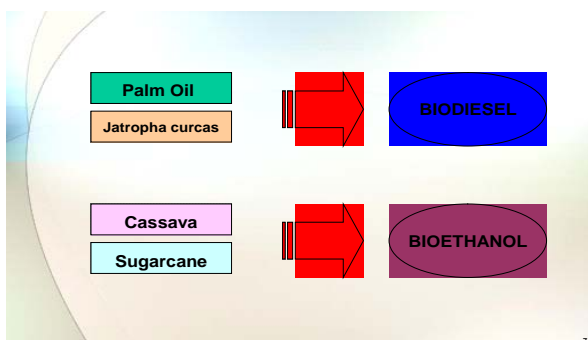


Fig. 7.6.2. BIOFUEL FEEDSTOCK.

インドネシアでのバイオ燃料原料の大きな可能性は、開発可能なさまざまなバイオ燃料原料により提供される。やし油とジャトロファはバイオディーゼルの原料として開発されており、一方キャッサバとサトウキビはバイオエタノールの原料として利用される (Fig. 7.6.2)。しかし前述のとおり、イ

Fig.7.6.2. Biofuel feedstock.

インドネシアはバイオエタノールにはトウモロコシ、サゴヤシ、ヤシ糖、甘トウモロコシ、バイオディーゼルにはココナツなど地域のバイオエネルギーの可能性に応じて他のバイオ燃料原料の開発にも門戸を開いている。特殊バイオ燃料地帯の可能性のある土地は政府により決定されており、Fig. 7.6.3 に示されている。



No	Location	Commodity
1	Pacitan – Wonogiri – Wonosari (Pawonsari)	Cassava
2	Garut – Cianjur – Sukabumi Selatan	Cassava
3	Lebak – Pandeglang	Jatropha
4	Lampung – Sumsel – Jambi	Cassava, Sugarcane, jatropha, Palm
5	Riau	Palm
6	Aceh	Cassava, Sugarcane, Jatropha
7	Kaltim	Jatropha, Palm
8	Sulsel – Sultra – Sulteng – Gorontalo	Cassava, Sugarcane, Jatropha, Palm
9	NTB - NTT	Cassava, Jatropha
10	Maluku Utara	Sugarcane, Jatropha
11	Papua Utara and Irijaab	Palm
12	Merauke – Mappi – Boven Digul – Tanah Merah	Cassava, Sugarcane, Jatropha, Palm

Fig 7.6.3. Potential land for special biofuel zone.

インドネシアのバイオマス資源は、主として森林（熱帯雨林である重要な天然資源）、農園作物、農作物、および地方自治体（都市）の廃棄物である。農園作物の場合、（エネルギー代用でもある）最も重要なバイオマス資源の1つは油やし栽培 (*Elaeis guineensis*) である。インドネシアはマレーシアに続く世界第2位のやし油生産国であり（2006年に約6百万ヘクタールの農園の合計土地面積および15百万トンのやし油原油(CPO)生産を示しており、

Fig. 7.6.4 インドネシア油やし農園の面積と生産量参照) 世界生産の18%を占めている。インドネシアのやし油産業は、通年ベースで数百トン廃棄物を生産する大きな工場を使用して急速に拡大を続けている。環境に対する影響を国内的および国際的に緩和しながら、残余物バイオマスから大量のバイオ燃料（100,000トンのCPOで100,000トンのバイオディーゼルと12,000トンのグリコールを生産）および蒸気と電力を生産するための注目に値する機会がインドネシアと他の諸国に存在している。やし油生産プロセスから生成されたやし油残余物は次のとおりである。新鮮な果実房 (FFB)



Fig. 7.6.4. Area and production Indonesia oil palm plantation. Source : Wahono, 2007

または油やし果実は、バイオディーゼル生産または蒸気および電力生成に利用できるやし油原油 (CPO) およびやし種油 (KPO) を生産する。

インドネシアの気候はまた、サトウキビ (*Saccharum officinarum*) に非常に適していることでよく知られている。インドネシアは、サトウキビ遺伝子が最も豊かな国であり、世界のサトウキビの起源と信じられている (パプア)。2 百万ヘクタール以上の土地がパプア (大部分)、カリマンタン、スマトラ、マルクおよびジャワに散在するサトウキビ畑に適している。適切な立案、方針および開発により、将来インドネシアが (ブラジルと同様に) 砂糖輸出国およびバイオエタノール産出国となる可能性が非常に高い。

バイオエタノール原料の 1 つとして知られるキャッサバ (*Manihot esculenta*) は特にランブング、ジャワおよび NTT 地域の農民により現在集中的に耕作されている。2005 年に耕作面積はインドネシア全土で約 1.24 百万ヘクタールであり、生産量は 19.5 百万トンであった。キャッサバからバイオエタノールへの変換は 6.5 : 1 であり、あるいは 1 トンのキャッサバから 166.6 リットルのバイオエタノールが生産される。

Jatropha curcas (英語名 : *Physic nut* (下剤ナット)) はバイオ燃料用のもう 1 つのバイオマス源であり、やし油やキャッサバと違って種と油は食用不可であるので、食品対燃料の競合は存在しない。

日本による占領時期 (1942~1945 年) に、ジャトロファの植え付けは土地の人々に強制されていた。そのため現在でも NTT および NTB 県などの島の東部でジャトロファが見つかる。*Jatropha curcas* にはさまざまな地域名が付けられている。*nawaih nawas* (アチェ)、*jarak kosta* (スンダ)、*jarak gundul*、*jarak cina*、*jarak pagar* (ジャワ)、*paku kar* (チモール)、*peleng kaliki* (ブギス) など。

また、危機的な土地または不毛の土地でジャトロファ栽培が開発される場合、2 つの手順、つまり

地方/地域環境の改善を生じる植林または移植および保存作業が達成済みである必要がある。また、ジャトロファ油は燃料として抽出、使用が可能である。通常、ジャトロファの種の平均成分は 1,500 リットル/ha/年であり、生産性は乾燥種の 5 トン/ha で、油歩留りは 30% である。

農業省の農業協会の研究開発は、インドネ

アジアバイオマスハンドブック

Land suitability map for *Jatropha curcas* in Indonesia (1 : 1.000.000)



ICECRD 2007

シアのさまざまな県の約 19.8 百万 ha の土地（上記地図、オレンジ色参照）がジャトロファ栽培に適していることを確認しており、その内 14,277 百万 ha の土地は非常に適していると分類され、5,534 百万 ha は適している（緑色）と分類されている。適している土地は 31 県に散在しており、最大の土地は東カリマンタン、南東スラウェシ、東ジャワ、南カリマンタン、ランピング、パプア、および西イリアンジャヤ県に存在している。インドネシアでのジャトロファ耕作面積は 2015 年までに 3 百万 ha に達する。燃料としてのジャトロファ油はインドネシアの農村部、つまり「エネルギー自給農村」で重要な役割を果たし、最終的には貧困無職軽減目標を達成する。

もちろん、熱帯にある国家であるインドネシアは、ココナツ (*Cocos nucifera*)、トウモロコシ (*Zea mays*)、サトウモロコシ (*Sorghum bicolor* L.)、arenga pinnata、ゴム (*Hevea brasiliensis*)、ひまわり (*Helianthus annuus*)、nipha (*Nypa fruticans*)、甘薯 (*Ipomoea batatas* L.)、サゴ (*Metroxylon* sp.) などエネルギー資源として開発、利用が可能な他の多くのバイオマス資源を持っている。

参考文献

- Andi Alam Syah. *Biodiesel Jarak Pagar*. PT AgroMedia Pustaka. Jakarta. 2006.
- Bambang Prastowo. *Sustainable Production of Biofuel Crops*. Indonesian Center for Estate Crops Research & Development. On Sustainable Aspect of Biofuel Production Workshop, Jakarta. June 21, 2007.
- Joachim Heller. *Physic nut*. IPGRI. Germany. 1996.
- Bambang Prastowo. *Sustainable Production of Biofuel Crops*. Indonesian Center for Estate Crops Research & Development. On Sustainable Aspect of Biofuel Production Workshop, Jakarta. June 21, 2007.
- Paulus Tjakrawan. *Indonesia Biofuels Industry*. Indonesia Biofuels Producer Association (APROBI). On Sustainable Aspect of Biofuel Production Workshop, Jakarta. June 21, 2007.
- Rama Prihadana et al. *Bioethanol Ubi Kayu : Bahan Bakar Masa Depan*. PT AgroMedia Pustaka. Jakarta. 2007.
- Rama Prihadana & Roy Hendroko. *Energi Hijau*. Penebar Swadaya. Jakarta. 2007.
- Soni S. W. *Energy Generation Opportunities from Palm Oil Mills in Indonesia*. 4th Asia Biomass Workshop. Kuala Lumpur, November, 2007.
- Sudradjat H.R. *Memproduksi Biodiesel Jarak Pagar*. Penebar Swadaya. Jakarta. 2006.
- Tim Nasional Pengembangan BBN. *Bahan Bakar Nabati*. Penebar Swadaya. Jakarta. 2007.
- Wahono Sumaryono. *Palm Complex Model : An integrated preliminary concept for sustainable plantation and CPO-based industries*. 4th Asia Biomass Workshop. Kuala Lumpur, November, 2007.

7.7 カンボジア

7.7.1 バイオマス資源

木質廃棄物や農業廃棄物といったバイオマス資源は、カンボジアには豊富に存在する。バイオマスの燃料利用は、国内のエネルギー消費のおよそ 80%を占めると見られている。しかし、バイオマス発電に関しては、小規模プロジェクトが 2, 3 あるのみで国内の総発電量に占める割合は微々たるものである。木質バイオマスが、国内で利用されるバイオマスエネルギーの 95%以上を占める。

予備調査によれば、コメ籾殻やいくつかの農業廃棄物、新規植林に伴うゴムノキの廃材、そして人工林や管理された天然林からの木材が、発電のために高いポテンシャルを有するエネルギー資源である。これらの資源の現状は次の通りである。

(i) **コメ籾殻**：2003 年には、230 万 ha の耕地でコメが栽培され、470 万トンが生産された。欧州委員会が ASEAN 諸国におけるコージェネレーションを推進するために支援している COGEN3 計画の中で予備調査を実施しているが、それはプノンペン近郊の Angkor Kasekam Roongroeng にある精米工場に 1.5 MW の発電能力を持つバイオマス火力のコージェネレーションの可能性に関する調査である。

(ii) **カシューナッツ殻**：カシュー (*Anacardium occidentale*) は、ウルシ科アナカルディウム属の木であり、カシューナッツは、カシューの果実の種子である。カシューナッツの木はカンボジアで 37140 ha に植えられ、生産者が増えている。国内の生産量は 14000 トン/年と予想される。

(iii) **その他の農業廃棄物**：バガスは、サトウキビから砂糖を生産する際に発生する残渣であり、サトウキビの重量の 30%を占める。砂糖生産の主要国では、砂糖生産工場への直接燃焼発電システムが広く導入されてきた。2003 年には、カンボジアで 330649 トンのサトウキビが生産された。ココナッツとキャッサバの生産量は不明であるが、2003 年のピーナッツ生産量は 18483 トンである。ピーナッツの殻の重量は、総重量の約 30%である。

(iv) **森林からの木質バイオマス**：人口の 95%が調理用に木質燃料を利用し、国内の総エネルギー供給量の 86%を木質バイオマスが占めている。木質燃料の消費量については、1995 年の数値で約 600 万 m³と見積もられている一方、用材としての生産量は 150 万 m³であった。

(v) **人工林**：カンボジアの人工林面積は 11125 ha、主要樹種はアカシア属とユーカリ属である。植林の主な目的は、輸出用の木材チップの生産である。

(vi) **プランテーション**：成長の早い樹種によるプランテーションは、農村レベルでの電化のためにバイオマスを供給する手段として適している。Battambang 地方の Anlong Ta Mei 地域エネルギー協同組合は、カンボジアで唯一、プランテーションで栽培した樹木を燃料としたバイオマス発電を行っている。

(vii) **社会林業**：カンボジアにおいては、社会林業が森林を持続可能な形で管理していくための重要な方策であると認識されている。社会林業の活動は、再造林よりはむしろ現存する原生林または劣化林を管理するというのが大抵のケースである。

7.7.2 バイオマス発電事例

(i) 家畜・農業開発センター (CelAgrid)

CelAgrid は主に農業技術に基づく地域開発に関する様々な研究を行っている部門である。ここでは 17 名の研究スタッフと 40 名の学生が働いている。2004 年 9 月にインドの Ankur Scientific から発電容量 9 MW のバイオマスガス化発電システムを購入した。現在、様々なバイオマス資源、つまりココナツの殻、キャッサバの茎、クワノキの茎、カシヤを、ガス化に関する持続性および効率性の観点から比較する研究を行っている。

(ii) Anlong Ta Mei 地域エネルギー計画

Anlong Ta Mei 村 (Battambang 県 Bannan 地域) の地域エネルギー協同組合プロジェクトは、調査研究ではなく経済性のベースで稼働している唯一のバイオマス発電システムである。このプロジェクトでは、CelAgrid と同型の 9 MW のバイオマス発電システムを導入し、小規模の電力供給網を設置した。ギンコウカン属 (*Leucaena*) を植林し、その枝を燃料として利用するという形態で 2005 年 2 月に稼働を開始した。

(iii) NEDO バイオガスハイブリッド発電計画

203 年 12 月に、日本の NEDO が Sihanoukville 近郊に、50 kW の太陽光発電と 35 kW の二つのバイオガスエンジンからなるハイブリッド発電システムの建設を完了した。バイオガスは農場の家畜糞尿が原料であり、現在も稼働を続けているが、あくまで実証レベルであり、まだ経済性のあるものではない。

7.7.3 木質その他のバイオマス利用

- 燃料用木材の 94% が直接燃やすことにより利用されている。

- 6%の燃料用木材は木炭に変換される。
- 燃料用木材の90%が、地方の一般家庭で消費される。
- 8%の燃料用木材は都市部の一般家庭で消費される。
- 燃料用木材が産業部門で消費される割合は1%未満である。
- 燃料用木材がサービス部門で消費される割合も1%未満である。
- その他のバイオマスすなわち木材、木質廃棄物、コメ籾殻などはレンガ竈、パン屋、食品製造の現場で利用される。
- サトウキビ殻、アブラヤシの枝葉は、サトウキビやアブラヤシを原料とした砂糖生産工場で利用される。
- ココナッツの枝や殻、コメ籾殻は、家畜の餌を調理する地方の一般家庭で利用される。
- ココナッツの枝、アブラヤシの枝、稲藁、コメ籾殻、木質廃棄物などを、調理用燃料として利用する地方もある。
- 以上のバイオマス資源を、暖房のためにも直接燃やしている。

7.8 マレーシア

マレーシアでは、バイオマス資源は主にやし油、木材、および農産業に由来する。これらの残余物はすべてやし油工場残余物、バガス、籾殻、および木材/森林残余物など多くの形態で提供される。主なバイオマス源は、空の果実房 (EFB)、繊維、殻、やしの幹、葉状体、およびやし油工場廃液 (POME) の形態の油やし残余物である。各残余物のエネルギー内容は相互に異なっている。その理由は、主として熱量、水分、および他のいくつかの異なるパラメータである。

次の表に示すように、やし油残余物は国内の最大のバイオマス廃棄物生産の割合を占めている。その理由は、やし油工場残余物が簡単に入手可能であり、現在費用効果的な処分手段を必要としているからである。現在、これらの残余物の大部分は焼却と投棄により処分されている。ごく一部は、非常に非効率な方法で工場の熱および電力要件に対する燃料として使用されている。

Table 7.8.1. Biomass and Energy Resource Potential.

Sector	Quantity kton / yr	Potential Annual Generation (GWh)	Potential Capacity (MW)
Rice Mills	424	263	30
Wood Industries	2177	598	68
PalmOil Mills	17980	3197	365
Bagasse	300	218	25
POME	31500	1587	177
Total	72962	5863	665

7.8.1 マレーシアでのバイオマスエネルギー利用

主としてやし油、木材、および農産業に由来する豊富なバイオマス資源は、加工活動用および発電用の蒸気の生成に主として使用されている。バイオマス燃料は、国内でのエネルギー消費量の約16%に使用されており、その内51%はやし油バイオマス廃棄物、27%は木材廃棄物によるものである。他のバイオマスエネルギーの材料は、植物栽培、動物、および都市廃棄物によるものである。現在約400か所のやし油工場が操業しており、内部消費だけでなく周辺遠隔地域用に油やし廃棄物から電力を自己発電している。研究の結果、マレーシアで利用可能な潜在的バイオマスの75.5%が未使用で廃棄されていることが判明している。

7.8.2 油やし残余物

油やし産業は、収穫、移植、および粉砕プロセス時に残余物を生成する。粉砕プロセスからの残余物は、果実の繊維、殻、および空の果実房 (EFB) である。幹および葉状体などの他の残余物は、農園地域で入手可能である。現在、殻と繊維は工場で消費する蒸気と電力を生成するためのボイラー燃料として使用されている。EFBは、マルチングのため農園へ戻される。これは大きな農園のみ実践されている。古いやし油工場の場合、EFBは肥料生産のため焼却炉で焼却される。しかし、埋め立て法でEFBを処分しているやし油工場がまだ存在しており、特に十分な農園または土地を持たない工場がそうである。

やし油工場廃液 (POME) は、殺菌プロセス、原油浄化プロセス、および粉砕混合物分離プロセスから排出される廃液である。生成される POME の量は、粉砕作業に応じて決まる。日常業務が良好

なやし油工場の場合、生成される 1 トンのやし油原油から 2.5 トンの POME が生成されると推定される。マレーシアのやし油工場の平均値は、生産されるやし油原油 1 トン当たり 3.5 トンである。POME は、高度の化学的および生物学的酸素消費量と全固形分を含んでおり、環境への排出前に処理システムを必要としている。バイオガスは、POME の生物学的処理から生成される。成分は、主としてメタン (60~70%) および二酸化炭素 (30~40%) である。熱量は、4740~6560 kcal/Nm³ であり、発電はバイオガスの 1.8 kWh/cm³ である。いくつかの農園は、廃棄物ゼロ管理システムを実践している。

Table 7.8.2. Residue Product Ratio and Potential Power Generation from Palm Oil Mill Residues.

Type of Industry	Production Year 2002 (Thousand Tonnes)	Residue	Residue Product Ratio (%)	Residue Generated (Thousand Tonnes)	Potential Energy (PJ)	Potential Electricity Generation (MW)
Oil Palm	59,800	EFB at 65%MC	21.14	12,640	57	521
		Fiber	12.72	7,606	108	1032
		Shell	5.67	3,390	55	545
	Total Solid			16,670	220	2098
	POME @ 3.5m ³ per ton CPO or 65% of FFB)			38,870		320

7.8.3 稲の残余物

マレーシアでは稲の二期作が行われている。表作は 8 月 1 日から 2 月 28 日の稲栽培期間であり、裏作は 3 月 31 日から 7 月 31 日の稲栽培期間である。2000 年のマレーシアの合計稲栽培面積は、600,287 ヘクタールであり、2,050,306 トンの稲を栽培している。マレーシアの米自給率は約 65% であり、35%をタイとベトナムから輸入している。稲の藁と籾殻は、収穫および脱穀プロセス時にバイオマス残余物として生成される。稲の藁は田地に残され、籾殻は精米所で生成される。両バイオマスは、埋め立ておよび野焼きにより廃棄される。わずかな量の籾殻のみが発電およびシリカ生産や堆肥化などの他の用途に使用される。

わずか 2%の籾殻がエネルギー生成に使用されていると想定される。残りは埋め立て法に使用される。稲の藁は、通常解放された焼却地域で焼却される。将来生成される籾殻と稲の藁の量は、栽

培される地域、田地、および農業に対する政府の方針に応じて決まる。政府は、将来歩留りを現在の割合から 10 メートルトン/ヘクタールに増加することを計画している。この目標値により、バイオマス CHP 工場により多くの籾殻と稲の藁が利用可能となる。固形バイオマスの課題は、材料の非常に低い密度と摩擦性のため輸送と取扱いが困難なことである。

Table 7.8.3. Residue Product Ratio and Potential Power Generation from Rice Mill Residues.

Type of Industry	Production Year 2000 (Thousand Tonne)	Residue	Residue product Ratio (%)	Residue Generated (Thousand Tonne)	Potential Energy (PJ)	Potential Power (MW)
Rice	2,140	Rice Husk	22	471	7.536	72.07
		Paddy Straw	40	856	8.769	83.86
TOTAL	2,140			1327	16.305	155.93

7.8.4 サトウキビ残余物

マレーシアでは基本的に、精糖生産用の原料としてサトウキビを使用しているのは製糖工場 5 か所のうちわずか 2 か所である。他の工場では、製糖用の原料として黒糖のみを使用している。この産業の主な目的は、食糧の安全保障供給、雇用創出、農村部での産業計画の開発、および外国為替の低減である。

バガスは、糖汁を除去するためサトウキビを処理した後の残余物である。平均的に、約 32% のバガスが処理される 1 トンのサトウキビから生産される。2002 年に処理されたサトウキビの量は約 1,111,500 トンである。したがって、生産されたバガスの量は 355,680 トンである。このバガスは、廃熱発電所用のボイラーに対するバイオマス残余物燃料として使用されるので廃棄されない。その結果、ボイラー燃料オイルと電力費用の工場経費が節減されている。

現在の利用率で、すべてのバガスが廃熱発電所用の燃料として使用されている。事実、製糖工場用のバガスは不十分である。したがって、籾殻、木材屑、およびやし油残余物の他のバイオマス残余物を燃料として使用するために購入している。

7.8.5 木材残余物

マレーシアでの森林面積合計は約 5.9 百万ヘクタールである。全面積のわずか 1.29%が木材産業に使用されている。残りは、主として永久的な森林の土地、植林、国有地、および永久的な森林の土地の野生動物保護地区と年間パトロールである。木工業は、主として木材産業、製材産業、パネル製品産業（合板、ベニヤ、パーティクルボード、および中密度ファイバーボード）、成形産業、および家具産業である。森林産業は、低価値製品の製造から付加価値製品へ急速にシフトしている。これらの産業は、さまざまな種類のバイオマス残余物、つまり鋸屑、切断屑、木材樹皮などを生成している。熱帯樹木供給不足のため、廃棄物最小化計画が木材ベースの産業で実施されている。パーティクルボードやフィンガージョインターなどの付加価値製品は、家具産業向けに木材廃棄物から製造されている。

木工業は、付加価値製品へのバイオマス残余物を最大化している。製材工場からの切断屑などの残余物は、窯乾燥用の燃料として使用されたり、ボイラー燃料として販売されている。合板およびベニヤ工場からの木材の中間部分は、ボイラー燃料として使用されている。残りの廃棄物は主として樹皮および鋸屑である。隔離された区域で、熱産生のため焼却炉またはボイラーで焼却されている。

木材の制限された供給および付加価値製品への残余物の最大化のため、木材ベースの産業からのバイオマス残余物の生成は減少している。処理工場からのバイオマスは、組み合わせされた発熱発電所への燃料として使用されるか、煉瓦メーカーなどの潜在的ユーザへ販売されている。次のチャートは、製材工場、合板工場、および成形工場から生成される廃棄物からの推定潜在エネルギーおよび電力を示している。

7.8.6 地方の固形廃棄物 (MSW)

マレーシアの人口は、1994 年以来年間 2.4%の割合または年間 600,000 人増加している。この人工増加と共に、MSW 生成も増加しており、MSW 管理が厳しくなっている。現在、MSW は主に埋め立てで管理されている。しかし、急速な開発および新しいスペースの不足により、この問題に取り組むため大都市および島では焼却を考慮している。

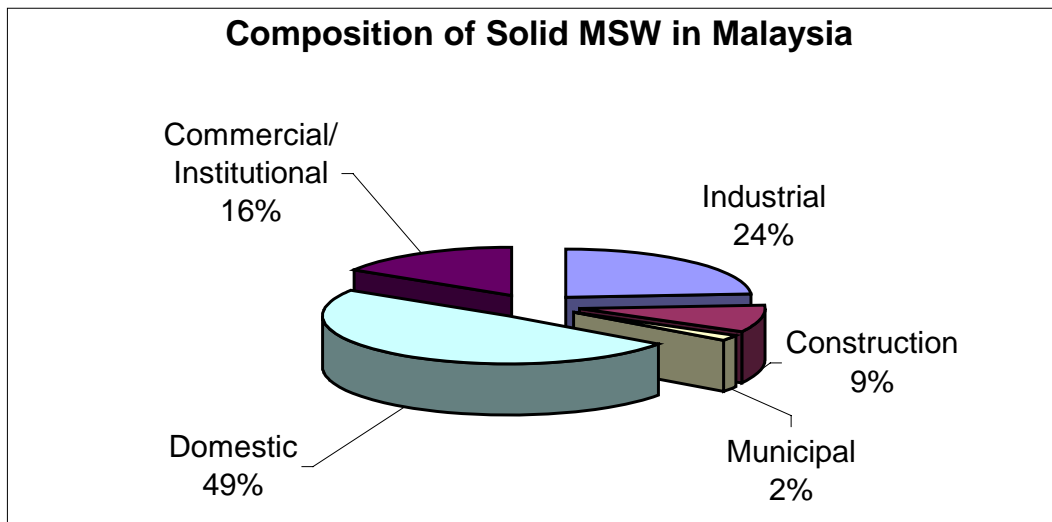


Fig. 7.8.1. Pie Chart of Typical Malaysian MSW Composition.

参考文献

- Norasikin A. Ludin, Mazlina Hashim, M. Azwan Bakri. Country Report – Workshop on Information for the Commercialisation of Renewables in ASEAN (ICRA). 25 – 27 August 2004
- Biomass Resource Inventory Report, BioGen Project Pusat Tenaga Malaysia
- National Renewable Energy Laboratory, The U.S. Department of Energy
- BioGen News – Issue 2, November 2004
- Economic Planning Unit, Eighth Malaysia Plan (2001 – 2005)
- CDM Energy Secretariat, Pusat Tenaga Malaysia: www.ptm.org.my/CDM_website/

7.9 フィリピン

7.9.1 基本エネルギー方針

フィリピンエネルギー計画は、エネルギーの独立性と電力市場改革の基本目標に焦点を当てている。

アロヨ政権の主要改革議題として、エネルギー独立性パッケージの目的は 2010 年以降に 60% のエネルギー自給率を達成することである。この目標を実現するため、5 つの主要戦略が確認されており、これにはバイオマスエネルギーを含む再生可能エネルギー (RE) に直接関連する 2 つの主要

戦略が含まれている。2つの主要戦略は次のとおりである。再生可能エネルギー資源開発の強化および代用燃料使用の増加。

7.9.2 再生可能エネルギー資源開発の強化

RE 開発と使用を促進するための政府の強化された努力と一致して、フィリピンのエネルギー省 (DOE) は RE セクターの需給見込みと現在の開発段階の展望内でさらに RE セクターを開発するため、その目的、目標、方針、戦略および計画を具体化する再生可能エネルギー方針の枠組みを明示した。具体的には、確認された長期目標は次のとおりである。(i) 来る 10 年以内に RE ベースの発電能力を 100%増加する、および (ii) 来る 10 年以内にエネルギーミックスへの RE の非電力貢献を 10 MMBFOE 増加するこれらの目標には、発電におけるバイオマス、太陽発電、および風力発電使用の増加が含まれている。

7.9.3 資源の可能性

フィリピンのエネルギー省 (DOE) の現在の計画に基づき、RE は 2005 年から始まる来る 10 年間に国内の基本エネルギー要件の 40%以上を供給する。ほとんど非電力用途に使用されるバイオマスなどの他の RE は、30%以上のシェアを持ちエネルギー供給ミックスでの RE の総シェアに対して最大の貢献をし続ける。電力開発計画によれば、バイオマスは 2007 年に 30 MW の電力を供給し、2008 年には 55 MW に増加する。

「フィリピンでのクリーン電力開発用の電力切り替えおよび戦略」という研究に基づけば、フィリピンはバガス資源から 235.7MW の潜在的資源容量を持っている。他の研究も、ルソン北部に現在設置されている 1 MW の籾殻火力発電所のようないくつかの小規模の 1~2 MW 籾殻火力発電所に対する国内の可能性を示している。

7.9.4 代用燃料使用の増加

政府は、輸送セクターでの代用エネルギー、特にバイオ燃料（つまりココバイオディーゼルまたはココメチルエステル、エタノール燃料および *jatropha carcus*）の使用を促進し続ける。

大統領は、バイオディーゼルおよびバイオエタノールの国内使用を義務付ける法律 RA 9367、つまりバイオ燃料法に署名した。

現在、バイオディーゼルは販売されるディーゼル総量の 1%が既に国内で使用されている。これは、法律承認 3 カ月後に最低 1%のバイオディーゼルの量を国内で販売されているすべてのディー

ゼルエンジン燃料に混合するという法律条項に従ったものである。フィリピンは、公認バイオディーゼルメーカー5社からの211.3百万リットルの年間能力を持っている。

2007年のバイオディーゼル要件は、1%混合で41百万リットルである。国内での100%法律遵守。

対象：

法律発効から2年以内に、フィリピンのエネルギー省は法律に基づき設定された国内審議会による研究の結果に応じて合計2%の混合を義務化できる。エタノールとバイオディーゼルの混合物がフィリピン国内規格に適合する場合。法律発効から2年後に、国内の各石油会社によりガソリン燃料総量の5%以上のバイオエタノール量が販売される。法律発効から4年以内に、フィリピンのエネルギー省は法律に基づき設定された国内審議会による研究の結果に応じて最低10%の混合を義務化できる。

原料要件：

バイオエタノールの場合、原料油の供給は最初は糖ベースのエタノールから行われている。さまざまな工場からの1日当たり880,000リットルの受託能力である。考えられる他の原料油は甘トウモロコシとキャッサバである。バイオディーゼルの場合、原料油はココナツ油またはCMEであるがジャトロファも考慮されている。

現在の原料油歩留り：サトウキビは23.98百万メートルトン、トウモロコシは5.25百万メートルトン、キャッサバは1.64百万メートルトンである。ココナツ油生産は、年間1,400百万リットルである（輸出用に80%、国内使用に20%）。

バイオディーゼル要件：2008年に年間85百万リットル、2010年に229百万リットル、2015年に277百万リットル。

参考文献

Banzon, J.A. and J. R. Velasco, Coconut: production and Utilization, 1982

Philippine Energy Plan 2005-2014 (2006 Update)

Elauria, Jessie C., Policy and Actual Biomass Status in the Philippines. Paper presented during the Biomass Asia Workshop held in Japan

Elauria, J.C., M.L.Y. Castro, M.M. Elauria, S.C. Bhattacharya and P. Abdul Salam (2005). Assessment of Sustainable Energy Potential of Non-Plantation Biomass Resources in the Philippines. Volume 29. September 2005. pp. 191-198.

7.10 シンガポール

シンガポールは、都市環境と緑地管理に関する効果的なマネジメントのため、これまで常に“クリーンでグリーン”な“庭園都市”としての名声を得てきた。国土面積 700 km²、人口 450 万、これまで排水処理や廃棄物処理施設といった環境インフラへの投資を重点的に行ってきた。ごく最近、多くの国にとってモデルケースとなろう“Newater（下水再利用水）”計画の下、水資源のリサイクル・リユースに着手した。

2008 年現在、エネルギーセキュリティは国際的な問題となっている。原油価格は 1 バレル 100 米ドルを超え、地球温暖化と気候変動の問題は今や一般家庭にまで押し寄せている。ヨーロッパ主導のバイオ燃料需要が市場で大流行である。シンガポールは、日量 100 万バレル超の処理能力を有する世界で 2 番目に大きい石油精製施設を保有している。しかし、そこへの原油供給のほぼ 100% を輸入に頼っている。この輸入化石エネルギーへの依存体制は、他のエネルギー輸入国と同様に、シンガポールの経済および環境面での持続可能性に関して、必然的に外部要因に影響されることを意味している。この要因には、国際的な石油・天然ガス市場の価格変動、石油輸出国の政治的不安定性、化石エネルギー使用に伴う二酸化炭素排出量を規制するための京都議定書、公共部門のエネルギー消費パターンの変化などが含まれる。

政府は 1990 年代から、水素由来の燃料電池車のテストベッドを含む“シナジープログラム”のような、クリーンかつ化石資源に代わるエネルギー計画の推進を奨励してきた。最近では、クリーンで再生可能なエネルギーの研究開発に対して、大規模な支援計画が発表された。これは、1 年あたり 1500 MW に相当する太陽電池パネルを生産する製造業、そして太陽電池に必要なモノシリコンを生産する基盤製造プラントへの投資を呼び集めるものであった。

一方、民間部門の投資家は、東南アジアの熱帯地域というシンガポールの戦略的地利を、石油処理・貯蔵・精製のための洗練されたインフラとともに活用してきた。シンガポールは、近隣諸国のバイオマス資源から、直接恩恵を受けている。近年では、バイオディーゼル生産施設への海外からの大口の直接投資を集めた。現在 6 基のバイオディーゼル製造プラントの建設計画があり、その生産能力の合計はおよそ 200 万トン／年、投資総額は 20 億シンガポールドルに達する。これらの投資のすべては、石油植物か種子由来の油を国内で精製することを目的としている。これに伴う需要の予測に取り組むため、地域バイオ燃料分析センターが設立された。

国内については、シンガポールでは年間 65 万トンのバイオマス廃棄物が発生するが、その内訳

は食品廃棄物、木質・建築廃棄物、スラッジ・下水汚泥である。木質廃棄物の多くは、シンガポールの主要産業である海運業において、使用不能になったものが定期的に発生する木製パレットである。シンガポール政府はエネルギー省を通じ、また民間部門の投資家も木製パレットのエネルギー利用の機会を模索している。地域の投資家によって食品廃棄物のバイオガス化施設が建設されれば、日量 600 トンの都市ゴミがリサイクル・リユースに回され、うち 300 トンの木質バイオマスがコージェネレーションの燃料として利用される。園芸廃棄物からのエネルギーも重要である。政府は現在、ゴミ焼却施設や埋立地からバイオマス廃棄物を転用する取り組みを奨励している。バイオマス資源からエネルギーを回収することによって、民間部門の投資がより多くの利益を得ることが期待されている。

最後に、シンガポールは今後、投資を集めるための政府の積極的な政策の下、バイオエネルギー研究開発の最前線に立ち、より持続可能な第 2、第 3 世代のバイオ燃料技術を模索し、これら再生可能エネルギーの商業開発を先導していくであろう。

7.11 タイ

7.11.1 概要

タイ王立政府は、2005 年にエネルギー供給に占める再生可能エネルギーの割合を高める戦略を打ち立てた。これは、宣言された政策目標を達成するために、政策の方向性を調和させ、すべての政府省庁を結束させるために示された内閣の解決策であった。この政策面での必要性に応える形で、エネルギー省はエネルギー自給率を高めるために、以下の 7 つの戦略を示した。

1. 電力および天然ガスを統制する独立組織の設立
2. 国王陛下“充足”イニシアチブを抛りどころにしたエネルギーセキュリティの推進
3. 効率的なエネルギー利用の促進
4. 再生可能エネルギー開発の促進
5. エネルギーの最適な価格構造の模索
6. クリーン開発メカニズムの実施
7. 政策形成プロセスへの民間・公共部門の関与の奨励

7.11.2 バイオマス由来エネルギーの目標

政府が掲げた目標は、国内の最終エネルギー消費における再生可能エネルギーのシェアを、2005年の0.5%から2011年には8%、654万石油換算トンに増やすというものである。輸送燃料については、2011年までに3%をバイオ燃料で賄うとしているが、少なくともバイオエタノールで300 ML/日、バイオディーゼルで400 ML/日が必要となる。バイオマス由来の熱と蒸気は、2011年までに4%に相当する394万石油換算トンである。電力のシェアについては、2011年までに再生可能資源で1%に相当する3251 MWという目標が定められた。最近の原油価格の高騰の影響で、政府は目標の修正を宣言したが、それはE20(ガソリンにエタノールを20%混合したもの)を2008年1月1日から、B2(ディーゼルに2%のバイオディーゼルの混合したもの)を2008年2月1日から、それぞれ義務づけるというものであった。これにより、タイは国内全域でバイオエタノールとバイオディーゼルの双方を完全商業化したアジアで最初の国となった。

7.11.3 義務

上記の政策目標と実施工程は、国家エネルギー政策委員会により、定期的に見直し、修正が行われ、政府に報告されるようになっている。

7.11.4 バイオマス利用

2007年末の時点で、国内の4000以上のガソリンスタンドでE10が、すべてのガソリンスタンドでB2が、それぞれ政府による義務づけにより販売されている。5%混合のバイオディーゼルも3000以上のガソリンスタンドで利用可能である。12月のバイオエタノール販売量は、日平均600 kLであった。バイオディーゼルについては、2~5%を義務化する前の時点で150 kL/日であったが、これがすべてのディーゼルに2%混合を義務づけたことで、2008年2月のバイオディーゼル利用量は1000 kL/日を超える水準に跳ね上がった。再生可能エネルギーによる発電量は2057 MWに達し、バイオマス由来の熱と蒸気については、2007年は184万石油換算トンであった。

7.11.5 バイオ燃料生産量

バイオディーゼルの生産量は約1150 kL/日、生産能力は2185 kL/日である。バイオエタノールの生産量は700 kL/日(2008年2月現在)、生産能力は1150 kL/日である。

7.11.6 バイオ燃料の導入状況

タイでは、バイオ燃料の導入が加速している。E10 は 20 ML/日のガソリン消費量のうち、6 ML/日に達しており、2007 年末の時点で、ガソリンの総消費量に占める市場シェアは 23%である。バイオディーゼルは、2007 年 12 月には、50 ML/日のディーゼル消費量のうち 3 ML/日が消費された。2008 年 2 月の消費量については、政府による義務化によって 50 ML/日の総消費量のうち 5 ML/日が B5、残りが B2 である。

7.11.7 エネルギー作物

エタノール生産を目的として、100~200 万トンの糖蜜が原料として使用されている（糖蜜とは砂糖生産の副産物であり、生産量 6400 万トンのサトウキビからおよそ 500 万トン発生する）。他にはキャッサバが原料として用いられるが、これは総生産量 2600 万トンのうち 18 万トンのみがエタノール向けである。バイオディーゼルについてはヤシ油が使用されるが、2007 年は総生産量 150 万トンのうち 10 万トンがバイオディーゼル生産に用いられた。2008 年には、これが 30 万トンの水準に達すると見られている。

7.11.8 将来展望

2008 年には、糖蜜あるいはキャッサバを原料としたエタノールプラントが数多く稼動開始予定である。2008 年末には、その生産能力が 800 ML/日に達すると予想されているが、タイでは余剰作物のために生産量をさらに高めることが可能である。バイオディーゼルに関しては、政府がオイルパームのプランテーションを今後 5 年間、毎年 20 万エーカー拡大していく方針を掲げたことから、バイオディーゼル生産目標に見合うだけの原料は十分であると思われる。2011 年までに、国内のオイルパームプランテーションの面積は 110 万ヘクタールになり、少なくともその半分はバイオエネルギー生産に充てられると考えられている。この点においては、タイのバイオエネルギー作物開発は、適切な政策実施によって、地方の農業部門にとって収入を増やすための新たな原動力となるであろう。また、バイオマスエネルギーに関する拡大メコン地域間での協力も、地域のエネルギー自立にとって重要性を増すであろう。

7.11.9 成功事例

タイは、国内すべての地域でバイオエタノール、バイオディーゼルともに入手可能といったよう

に、バイオエネルギーを主要な消費市場とする政策を採用する、現時点ではアジアで唯一の国である。再生可能資源による電力、熱および蒸気の利用も産業界で推進されており、政府目標を達成するための実質的な進展が見られる。

タイ国金属材料技術センター (MTEC) とタイ国科学技術省 (NSTDA) は、産業界を支援し、中小企業にはエネルギー生産・利用にあたりバイオエネルギーを採用、あるいは組み込むための研究開発に焦点を当てる予定である。タイの成功は、周辺地域の国々、とくにラオス、カンボジア、ミャンマー、ベトナムにとって、新規開発技術をもって発展する道を模索する上で、参考事例となるであろう。近い将来、クリーン開発メカニズム、あるいは気候変動への対応スキームが、重要な開発課題となることも考えられる。

7.12 ベトナム

7.12.1 政策

ベトナムでは、プロジェクト No 177/2007/QD-TTg (2007年11月20日) : 2015年までのバイオ燃料の開発と 2025年までのビジョンおよび政府戦略 No 1855/QD-TTg (2007年12月27日) 2020年までの国家エネルギー開発と 2050年までのビジョンを策定している。また、導入目標として2010年、2020年および2050年の新および再生可能エネルギー比率 3%、5%および 11%を承認した。導入に関する義務化はまだないが、産業・貿易省、科学技術省、農業・農村開発省、天然資源・環境省が協力して進めている。

7.12.2 バイオマスの利用

バイオマス別の賦存量、利用量、利活用方法などを以下にリストする。

- 家畜廃棄物資源量: 豚糞 25.7Mt/年、牛糞 20.2Mt/年、水牛糞 16.0 Mt/年。都市ゴミ 6.4 Mt/年(利用率 70-80%、用途は肥料、バイオガスなど)。
- 食品廃棄物: 定量値なし (用途は動物飼料)。
- 紙: 消費量 997,400t/年、リサイクル率 70%。
- 黒液: 定量値なし、利用率 40%(燃焼)。
- 製材量: 3,414,000 立方メートル。おがくず: 利用率 100%(エネルギー用)。

- 林地残材:資源量 164 万 8500 トン/年、利用率 0%。
- 農産物の非食部: 資源量 稲わら:76Mt/年、米殻 7.6 Mt/年。
- バガス: 2.5 Mt/年、利用率 20%(コンポスト、家畜飼料、家畜敷料、発電、きのこ生産...)
- 廃食用油: 73,800 t/年。
- 「Basa」魚油: 60,000 t/年。現在 10,000t/年を生産 (2005)。

バイオ燃料については以下の通り。

バイオエタノール

原料: キャッサバ、糖蜜、米生産

生産量 76.63ML (2006 年)。

バイオディーゼル燃料

原料: 廃食用油、Basa 魚油、ゴム油、ジャトロファ油

生産量: 研究開発プロジェクト段階

今後、農業残さからのバイオ燃料生産の新技术開発が求められている。

7.12.3 資源作物

資源作物の生産は現在行われていない。政府は、2021 年までに E5 を 100,000 t/年、B5 を 50,000 t/年の導入を計画している。今後、キャッサバを使用して 100ML/年の生産を行うエタノール工場 2 ヶ所を予定している。また、糖蜜とサトウキビを使用して 50ML/年を生産する工場も 1 ヶ所予定している。

7.12.4 成功事例

40,000 基の家族規模のバイオガス発酵装置 (1-50 m³) が導入されている。

7.13 日本

7.13.1 政策

「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」が 2002 年 1 月に改定され、バイオマスが新

エネルギーとして位置づけられた。これにより、バイオエネルギーの導入に補助制度が適応されることとなった。導入目標は経済産業省の総合資源エネルギー調査会で決めており、バイオマスに関しては、2010年に熱利用として原油換算 308 万 kL、発電利用として原油換算 586 万 kL が掲げられている。しかしながら、導入義務はない。

「バイオマス・ニッポン総合戦略」が 2002 年 12 月に閣議決定された。2006 年 3 月の見直しで、2010 年の目標として、輸送用燃料 50 万 kL、未利用バイオマスの利用率 25%、バイオマスタウン 300 地区が掲げられている。農林水産省ではこのバイオマスタウン（市町村が策定するバイオマス利活用の構想）の取り組みを強く進めている。

7.13.2 バイオマスの利用状況

日本におけるバイオマスの利用状況を Fig. 7.13.1 に示す。家畜排せつ物はたい肥等で利用される。食品廃棄物は肥飼料として、製材工場等残材はエネルギー・たい肥として、建設発生木材は製紙原料、家畜敷料等として、下水汚泥は建設資材・たい肥として、農作物非食用部はたい肥、飼料、家畜敷料等として、紙はリサイクルや熱源として、黒液は燃焼熱源として、それぞれ利用される。林地残材はほとんど利用されていない。

バイオディーゼル燃料（BDF）は廃食用油から年間約 3,000 t がつくられている。バイオエタノールはほとんどが R&D の段階である。2007 年に商業的生産が始まり、廃材を原料として年間 1,400 kL が生産されることになっている。2007 年には ETBE 混合ガソリン（エタノール 3%相当）と E3 ガソリン（直接混合、エタノール 3%）のテスト販売が始まった。

エネルギー作物はまだ導入されていない。土地の制約や人件費が高いことから導入には限界がある。沖縄ではサトウキビの生産とエタノール製造の実証事業が行われている。

7.13.3 成功事例

ファーストエコ社は廃材を収集して発電を行う事業を商業的に行っている。発電会社を 3 社設立して運営している。発電規模はそれぞれ岩国ウッドパワー社 10,000 kW、白河ウッドパワー社 11,500 kW、日田ウッドパワー社 12,000 kW である。

7.13.4 その他

特になし

参考資料

MAFF webpage: <http://www.maff.go.jp/j/biomass/index.html>



Fig. 7.13.1. Status of biomass utilization in Japan.

7.14 台湾

7.14.1 政策, 義務および目標

台湾におけるエネルギー政策の重要な責務の一つに、エネルギーの自立性を高めるためにエネルギー供給を安定させることが挙げられる。自給率を高めるために、設置済みの再生可能エネルギーからの発電容量は全体の12%に相当することが確認されており、2010年には総発電量の10%を賄うという目標が掲げられている。バイオマスと廃棄物からの発電容量は、再生可能エネルギーの中で3番目、2010年には総発電容量の1.44%に相当する741 MWと見込まれている。再生可能エネルギーの利用を促進するために、“再生可能エネルギー開発法案”が起草され、立法院に提出されている。

近年の顕著な傾向としては、輸送部門でのバイオ燃料の利用が挙げられる。2004年には、ゴミ収集車に20%のバイオディーゼルを混ぜたB20を適用する試験計画が、環境保護局により開始された。それ以降、エネルギー局は4つの実証試験を推し進めている。一つは、2006年に始まった“緑のバス計画”で、公共部門で走行するバス車両に2%のバイオディーゼルを混ぜるというものである。もう一つは、桃園郡、嘉義郡のガソリンスタンドで1%のバイオディーゼルを混ぜたB1の試験販売が2007年に始まり、それは“緑の郡促進計画”と呼ばれている。3つ目は、2008年7月までに、全てのガソリンスタンドでB1の販売を開始するというものである。そして最後は、域内のB2流通量を、2010年には年間10万kLにすることである。

バイオエタノールの適用も2007年に始まった。台北市の8つのガソリンスタンドでE3の試験販売が始まったが、それは主に公用車を対象にしたものである一方、民間車にもそれを利用することが奨励されている。2009年1月には、台北市と高雄市の全てのガソリンスタンドでE3の販売を開始するという目標がある。域内のE3流通量については、2011年に100 dam³/年(10万kL/年)と予想されている。

現在のところ、バイオマス利用に対する補助金はやはり不可欠である。関連する法案には以下のものがある。

- 再生可能エネルギーからの電力の購入を義務づける法案
- 埋立地で発生するメタンからの発電に対して報奨金を支払う法案

- “緑のバス計画”のためのエネルギー作物に補助金を支払う法案
- “緑の郡促進計画”に補助金を支払う法案
- “緑の公用車試験計画”に補助金を支払う法案

エネルギー作物を栽培する面積が限られることを考慮すれば、海外からバイオ燃料を輸入する可能性が高い。バイオエタノールやバイオディーゼル等の輸入再生可能エネルギーの管理能力を高めるために、“石油管理法令”は改訂されるべきである。

7.14.2 資源量

現在のところ、台湾におけるバイオマス利用の多くは廃棄物と残渣である。特筆すべき項目には以下のものがある。

- 発電施設を備えた廃棄物焼却施設が 24 あり、その発電容量は 528.8 MW である。
- 4 つの埋立地と数箇所の中小規模の養豚場で発生するバイオガスを利用した発電施設。
- バガス、製紙残渣、廃プラスチック、米籾殻、RDF 等の産業廃棄物、農業廃棄物を燃料とした発電所も数箇所あり、その発電容量は約 67.5 MW である。

加えて、企業に対する使用済み調理油のリサイクルの励行が 2007 年に始まり、一般家庭に対しても奨励されている。使用済み調理油からのバイオディーゼル生産量のポテンシャルは、約 80 dam³/年 (8 万 kL/年) と見積もられている。

80 km² (8,000 ha) の休耕地におけるエネルギー作物の栽培が計画されており、エネルギー作物の栽培可能面積は 5,000 km² (50 万 ha) である。

また、100 km² (1 万 ha) の海岸で海草が栽培されれば、150~300 dam³ (15~30 万 kL) のバイオディーゼル生産能力が期待される。

第 8 部 バイオマス利用例

8.1 小規模バイオメタン化

8.1.1 バイオメタンおよびバイオメタン化とは

バイオメタン（「バイオガス」とも呼ぶ）は、有機材料が腐敗するときに生成される。バイオメタンの主成分は、 CH_4 （55～60%）と CO_2 （25～45%）である。バイオメタンは、調理、照明、加熱、発電などに使用できる。

バイオメタン化は、「嫌気性消化」として知られる空気不在状態での微生物作用による廃棄物（液体または固体）内の有機物をバイオメタンおよび肥料への変換するプロセスである。

8.1.2 中国でのバイオメタンの状況

中国での廃棄物の年間数量は 150 百万トンである。適切なあるいは固有の処理なしの大量の生活および産業廃棄物の生産および処分は、広範な環境汚染をもたらす。一方、いくつかの廃棄物は回収可能であり、バイオメタンは糞尿が分解する嫌気性消化装置から生成される。特に送電が高価である遠距離の農村部では、バイオメタンは調理、照明、暖房用などのエネルギーを供給する良い方法である。

1950 年代以降、中国政府は原料として家畜および農業の廃棄物を使用した小規模バイオメタン化を奨励している。Table 8.1.1 は、中国での農村部のバイオメタン開発を示している。2006 年までに、農村部の約 20 百万の家庭が調理および照明用にバイオメタンを使用する。年間生産量は、5 百万石炭換算トンに達する。政府からの 2,500 百万 RMB の助成金は小規模バイオメタン化開発向けであり、つまり 1 つの小規模バイオメタン化が 800～1200 RMB の助成金を受けることができる。中国政府は、2010 年に 30 百万のバイオメタン消化装置、2020 年に 45 百万のバイオメタン消化装置の製作を計画している。

Table 8.1.1. Survey of rural biomethane in China, 1991-2005.

Year	Biomethane digesters (million)	Annual output (billion m ³)
1991	4.75	1.11
1995	5.70	1.47
1999	7.63	2.25
2001	9.57	2.98
2002	11.10	3.70
2003	12.89	4.58
2004	15.41	5.57
2005	18.07	7.06

8.1.3 小規模バイオメタン化の特性

中国では、小規模バイオメタン装置の面積は約 6～8 m² である。その年間生産量は 300 m³ である。各バイオメタン消化装置の価格は 1500～2000 RMB である。

エネルギー供給はともかくとして、中国でのバイオメタンはまた次の特性を持っている。1) 環境に優しい：8～10 m³ のバイオメタン消化装置の場合、5～8 頭の豚または 2000～3000 羽の鶏の糞便を使用できる。2) 消化装置内の残渣（ごんさ）は肥料にも使用できる。3) 経済的である：電力購入代金または薪入手作業を節約する。木材も節約できる。

8.1.4 小規模バイオメタン化のプロセス

小規模バイオメタン化のプロセスには、原料収集、事前処理、発酵、処理と精製、貯蔵および輸送が含まれ、発酵消化装置が主な設備である。嫌気性であることを確保するため、消化装置は気密で不浸透性である必要がある。消化装置内の温度は、20～40℃に維持する必要がある。消化装置内には十分な糞尿が存在している必要がある。適切な水分（約 80%）と pH（7～8.5）が必要である。

回分発酵と半連続発酵が小規模バイオメタン化用の通常の技術である。回分発酵技術では、すべての原料が最初に加えられる。開始時にバイオメタンが急速に発生し、その後減少する。この技術は管理が簡単であるが、バイオメタン発生速度が変動する。半連続発酵技術では、原料の 1/4～1/2 が最初に加えられる。バイオメタン発生が遅くなると、バイオメタン生成を整えるためさらに原料が加えられる。

8.1.5 小規模バイオメタン化のエネルギー供給

通常、消化装置のバイオメタン発生速度は $0.2\sim 0.25 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ である。したがって、 10 m^3 消化装置の年間生産量は約 600 m^3 のバイオメタンである。通常、 1 m^3 のバイオメタノールの発熱量は 3.3 kg の生の石炭に等しい。以前述べたように、中国ではバイオメタンの年間消費量は5百万石炭換算トンに達した。農村部のエネルギー供給でバイオメタンが重要な役割を果たしているのは明白である。

参考文献

<http://www.cogeneration.net/BioMethanation.htm>

Wang Haibo, Yang Zhanjiang, Geng Yejiang. Analysis on the influence factors of rural household biogas production in China. Renewable Energy Resources, Vol. 25 No.5 Oct. 2007: 106-109

<http://www.biogas.cn/>

Gao Yunchao, Kuang Zheshi, etc. Development progress and current situation analysis of the rural household biogas in China, Guangdong Agricultural Sciences, 2006. 1: 22-27

Huang Fenglian, Zheng Xiaohong, etc. Actions and modes of household biogas for new rural area construction in China. Guangdong Agricultural Sciences, 2007. 8: 114-116

8.2 大規模メタン発酵施設

8.2.1 大規模メタン発酵施設の概要

メタン発酵技術の歴史は長く、英国などで1900年頃から工業利用が行われた記録が残っている。近年では、食品工場廃水・廃棄物、生ごみ、畜産糞尿、尿尿、下水汚泥など様々なバイオマスを、各々の性状に応じて効率的に処理すべく、メタン発酵槽の加温・攪拌方法・微生物固定化法などについて改良が重ねられ、大規模実用化が図られている。

8.2.2 大規模メタン発酵施設の処理フローと各設備の説明

大規模メタン発酵施設の基本設備フローを Fig. 8.2.1 に示す。

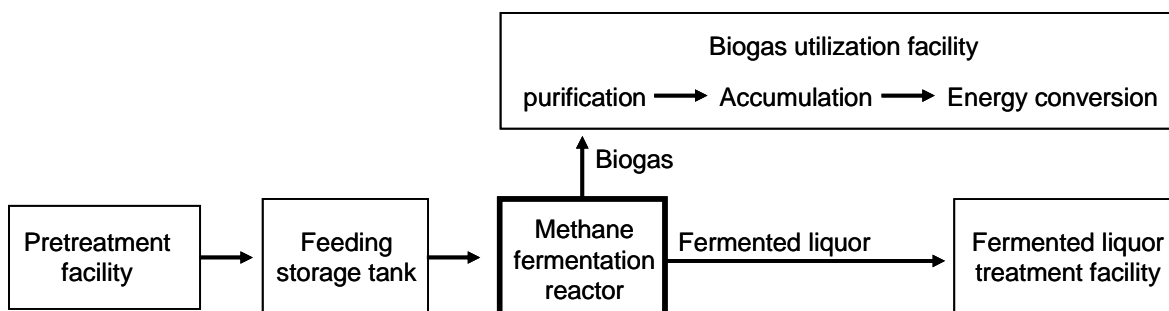


Fig. 8.2.1. A typical anaerobic digestion system in large-scale.

(a) 前処理設備

バイオマスがメタン発酵槽で効率よく処理されるように、バイオマス性状に応じて、発酵不適物除去、粉碎、水希釈、濃縮、酸・アルカリ処理などの前処理が必要となる場合がある。生ごみなど、一様な成分組成ではなく、様々な有機物および無機物の混合物である場合、磁選装置や分別機などによって、金属類やプラスチック類など発酵不適物の除去が行われ、適宜、粉碎した後、次工程へ送られる。

(b) 原料貯留槽

原料は、メタン発酵槽投入の平準化を図るため、一時、原料貯留槽で貯留される。原料貯留槽では、原料の微生物分解も始まり、有機酸などが生成されるため、pHが4程度にまで低下する。このため、原料貯留槽は、酸腐食を考慮した設計が必要となる。

(c) メタン発酵槽

メタン発酵槽では、機能分化された複数種の微生物が関与してバイオマスの分解を行い、「加水分解過程」、「酸生成過程」、「メタン生成過程」を経て、最終的に、メタンおよび二酸化炭素を生成する。下水汚泥や木質系バイオマスなど、難生分解性バイオマスのメタン発酵では加水分解過程が律速となる場合が多く、生ごみやデンプン廃水など易生分解性バイオマスのメタン発酵ではメタン生成過程が律速となる場合が多い。効率的な処理を行うには、これらの律速反応に対応したメタン発酵槽を採用することが重要となる。特に、易分解性バイオマスのメタン発酵では、メタン生成過程に関与する微生物群をいかに発酵槽内に高密度保持できるかが、その処理速度を大きく左右する要因となる¹⁾。

(d) 廃液処理設備

メタン発酵槽から排出される発酵廃液は、活性汚泥法などによる廃水処理を行い、残存する有機分や窒素、リン等を排水基準まで低下させた後、下水道放流もしくは河川放流を行う。

(e) バイオガス利用設備

タンパク質や硫酸根を含むバイオマスをメタン発酵処理する場合、バイオガス中には硫化水素が含まれる。また、下水汚泥など珪素含有量の高いバイオマスをメタン発酵処理する場合、バイオガス中にはシロキサンが含まれる。これらは、機器トラブルの要因となるため、バイオガスは、脱硫装置やシロキサン除去装置などのバイオガス精製設備を経由した後貯留され、ガスエンジン、ガスボイラー、燃料電池などで、電気・熱エネルギーに転換される。

8.2.3 大規模メタン発酵施設の事例

(a) 下水汚泥

下水汚泥は、下水処理過程において大量に発生する廃棄物系バイオマスであり、その減容化に古くから嫌気性消化技術が用いられてきた。下水汚泥を対象としたメタン発酵槽（消化槽）は、完全攪拌混合型を採用するケースが多く、今日では、有効容積 1 万 m³ にまで及ぶ大規模な消化槽も稼働している（Fig. 8.2.2）。これらの消化槽は、主に常温（20℃前後）～中温（35℃前後）で運転されており、20～30 日間程度の長い滞留時間が標準的な設計条件となっている²⁾。

(b) 有機性廃水

ビール工場廃水など、固形分をあまり含まない易生分解性の有機性廃水に対する大規模メタン発酵施設としては、オランダで開発された上向流嫌気性汚泥床（Upflow anaerobic sludge blanket ; UASB）法を採用した事例が多い³⁾。本法は、グラニュールと言われる嫌気性微生物が自己凝集した粒状汚泥を槽内に高密度保持することで、高速処理を可能としたものである。

(c) 食品系廃棄物

生ごみなど、固形性有機物を多く含む易生分解性のバイオマスについても、近年、高速処理を可能とするメタン発酵槽が種々開発され、大規模実用化に至っている。一例として、下降流固定床式メタン発酵リアクタ（Down-flow Anaerobic Packed-bed Reactor ; DAPR）は、生ごみや焼酎粕など食品系廃棄物を高速処理するシステムとして多くの実績を持ち、大規模なものでは、焼酎粕を 400 トン／日処理する施設も稼働している（Fig. 8.2.3）。



Fig. 8.2.2. Example of a large scale sewage sludge anaerobic digester.
(Northern second sewage treatment plant)



Fig. 8.2.3. Example of a large scale biomethanation plant of food waste.
(Distilled spirit processing waste recycling plant of Kirishima Shuzo co. LTD.)

参考文献

- R.E.Speece: Anaerobic Biotechnology, Archae Press, pp.127, Tennessee (1996)
- Japan Sewage Works Association: Sewage Facilities planning, policy and explanation (second part) 2001, pp.384 (2001)
- J.B.Lier : Current Trends in Anaerobic Digestion; Diversifying from waste(water) treatment to re-source oriented conversion techniques, 11th IWA World Congress on Anaerobic Digestion, 23-27 September 2007, Brisbane, Australia (2007)
- Hisatomo Fukui and Motonobu Okabe : Distilled spirit processing waste recycling plant using thermophilic dawn-flow packed-bed reactor, Gas fuel manufacture from biomass and its energy utilization, NTS, pp.265-275 (2007)

8.3 ジャトロファ栽培

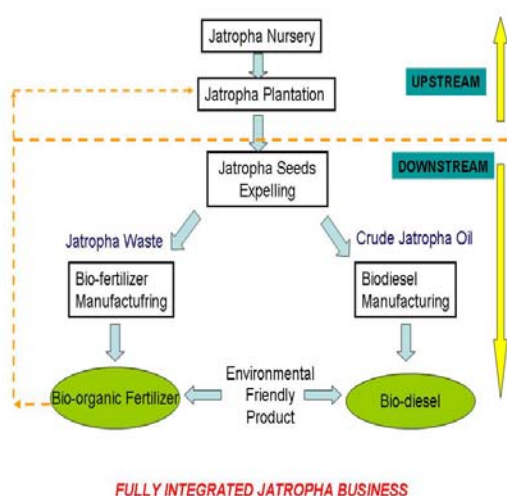


Fig. 8.3.1. Fully integrated jatropha business.



Fig. 8.3.2. Jatropha plantation. (Bambang P., 2007)

ジャトロファ統合事業は、上流および下流活動から成る。上流活動にはジャトロファの育苗とジャトロファの栽培がある。下流活動には、ジャトロファ油原油をバイオディーゼル製造用に使用できる種除去プロセスがあり、そこでジャトロファ副産物/廃棄物（種ケーキ、種殻、グリセリン）を使用してバイオ肥料の製造および他の用途を行うことができる。両方の活動は、環境に優しい製品として知られている。

8.3.1 ジャトロファの耕作

ジャトロファの耕作は複雑ではない (Fig. 8.3.2)。*Jatropha curcas* は荒地/辺境で成長可能であり、砂利、砂、塩分を含んだ土壌などほとんどどこでも成長する。最も貧しい石だらけの土壌で成長でき、年間の食用作物と競合せずに岩の割れ目などで成長するので、環境保護上の隙間を埋めることになる。9 日以内に完全な発芽が行われる。発芽時に肥料を加えることは逆効果であるが、発芽後に加えることは好ましい。しかし、通常は挿し木により繁殖させる。その理由は、種による繁殖よりも早く仕上がるからである。開花は先端に開くだけであるので、良好な枝分かれ（多くの枝

のある植物）は大量の果実を産する。もう 1 つの生産性要因は、花房内の雌花と雄花の比率である（通常 1 つの雌花に約 10 個の雄花がある。雌花が多ければ果実が増える）。

Jatropha curcas は、300~2,380 mm の年間降水量で成長可能であり、最適降水量は 625 mm/年である。植え付けを始める最適な時期は、乾季中か雨季後であり、年間平均温度は 20~28℃である。

8.3.2 繁殖法

2つの繁殖法がある。すなわち、生殖的繁殖（種まき）と増殖的繁殖（挿し木）である。単独事業の場合、満足できる植え付け幅は2 x 2、2.5 x 2.5、および3 m x 3 mである。これは、2,500、1,600、および1,111本/haの作物密度に相当する。しかし、挿し木により繁殖した植物は寿命が短く、種まきにより繁殖した植物よりも早魃および病気への抵抗力が低い。最初の2年間のみ、乾季の終わりに水をやる必要がある。耕しと植え付けは通常不要である。その理由は、この灌木が約40



Fig. 8.3.3. Jatropha fruits and seeds.

年の平均寿命を持っているからである。この植物の殺虫性および殺菌性のおかげで、殺虫剤および他の汚染物質の使用は不要である。

1 ha のジャトロファ農園は通常 2,250 kg の種 (Fig. 8.3.3. ジャトロファの果実と種) および 750 kg の油を産するので、種対油の比率は 3 : 1 である。種油は、プレスを使用して油圧的に、あるいは溶剤を使用して化学的に抽出できるが、小規模の場合には化学的抽出は不可能である。

8.3.3 ジャトロファバイオディーゼル

エステル化 - 「エストランス」プロセス (Fig. 8.3.4) として知られるエステル交換は、R. Sudradjat 教授により、開発され、特許取得されている。このプロセスには2つの段階がある。

1. このエステル化プロセスで、遊離脂肪酸（バイオディーゼルが酸性になる主な原因）はバイオディーゼル（メチルエステル）に変換される。

2. 油内の油脂内でまだ結合されているトリグリセリドと遊離脂肪酸は、エステル交換によりメチルエステルに変換される。このプロセスにより、99.75%の（グリセリンを除けば）バイオディーゼルへの油変換を達成できる。

このプロセスの他の特徴は、メタノール/エタノール反応剤の使用は 20%未満に低減でき、HCL 触媒を天然物（FKS）からかなり安価で再生できる固形触媒で代用可能であるということである。

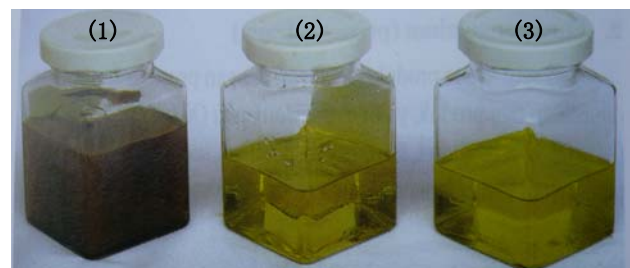


Fig 8.3.4. 3 grades estrans quality.

生産サイクルから、3つの等級のエストランス品質 (Fig. 8.3.4) を取得できる。1) ジャトロファ油原油 (CJO) - 直接燃焼に使用可能な軽油または重油の代用 ; 2) ジャトロファ油 (JO) - 低い回転数のエンジン (携帯発電機、トラクター/ブルドーザなど) 用の軽油 (ADO) の代用 ; 3) 燃料としてのバイオディーゼル (自動車)。

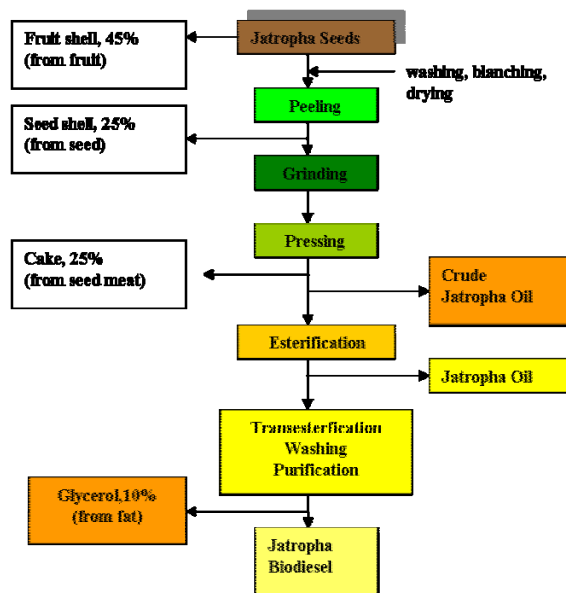


Figure 5. Jatropha Biodiesel Process Diagram
(Source: R. Sudrajat, 2006)

Fig. 8.3.5. Jatropha Biodiesel Process Diagram.
(Source: R. Sudrajat, 2006)

Fig. 8.3.5 は、種からのジャトロファバイオディーゼル生産の一般的プロセス図を示している。図示してあるように、皮むきプロセスへ進む前の種の洗浄、漂白、乾燥を含んでいる。生成された種肉は研削機で研削され、研削済み粉末は油圧プレス機 (手動または電動) によりプレスされる。その後、ジャトロファ油原油 (CJO) が抽出でき、残渣の種ケーキは動物の飼料、バイオ殺虫剤などに利用できる。

ジャトロファ油 (JO) の生産は、JO が 50~60°C に加熱されるエストランス反応器により実施される。溶剤 (5%) としてメタノールが使用され、HCL 触媒 (10% v/v) が加えられ、共に混合される。エステル化プロセスには、50°C で 2 時間かかる。混合物は、熟成プロセス

に 4 時間かかるグリセリン分離器へ送られる。グリセリン (白色ペースト) は底部に留まり、JO の上澄みを抽出し、水分離器および中和処理へ送ることができる。この水分離器の中で、脱塩水を使用して JO は 2 回洗浄され、そこでは、0.01% の NaHCO_3 を使用して中和が行われ、最後に水を使用して脱塩が再度実行される。最終製品は、保管タンクへ汲み上げられる。

バイオディーゼルの生産: JO は、50~60°C のエストランス反応器へ送られる。その後、メタノール (10% v/v) と KOH 触媒 (0.5% v/v) の混合物が反応器へ投入される。エステル交換プロセス時に 0.5~1 時間適切に攪拌し、温度を約 50°C に保つ。JO 生成と同じ手順でグリセリンからバイオディーゼルの分離する。洗浄および中和プロセスにも JO 生産と同じ手順を使用するが、この場合 NaHCO_3 ではなく 0.01% の酢酸 (CH_3COOH) を使用する。最後に、ジャトロファバイオディーゼルの最終製品がディーゼル燃料 (ADO) の代用に使用可能である。次の図にジャトロファバイオディーゼルの特性を示す。

Table 8.3.1. Characteristic comparison of Jatropha Oil, Biodiesel CPO & Diesel Oil.
(Source : Soerawidjaja, Tatang H, 2005)

Parameter	Jatropha Oil	Biodiesel CPO	Diesel Oil (ADO)
Density (g/cm ³)	0.92	0.87	0.841
Viscosity (cSt)	52	-	6 – 11.75
Cetane number	51	64	51
Flash point (°C)	240	182	50
Sulfur (ppm)	0.13	0.0068	1.2
Iodin number (mg iodine/g)	105.2 ± 0.7	-	-
Acid number (mg KOH/g)	3.5 ± 0.1	0.5	-
Calorific value (kcal/kg)	9,720	8,783	10,200

8.4 籾殻による発電

8.4.1 タイにおける発電の促進

エネルギーの現状に対応するために、エネルギー省(タイ)は、2007年に許認可制度を簡略化し、電力網を有する大手電力会社に電力を買い戻させることで、特にバイオマスを利用するSPP(小規模発電業者 1000万~9000万W)およびVSPP(零細発電業者 1000万W未満)を強力に後押し始めた。2007年10月時点でのSPPとVSPPの数は77を超え、設備容量は11億Wとなり、その電力の半数が大手電力会社に買い戻されている。

8.4.2 タイのバイオマス発電所

Fig. 8.4.1 に示すとおり、バイオマス発電所は全国に分散しているが、特に中央および北東部に多い。大手電力会社へ買い戻される電力という観点からみた場合、Fig. 8.4.2 に示すとおり、その発電所の半数以上が原料としてバガスを使用し、次いで35%が籾殻/ユーカリの樹皮を使用している。

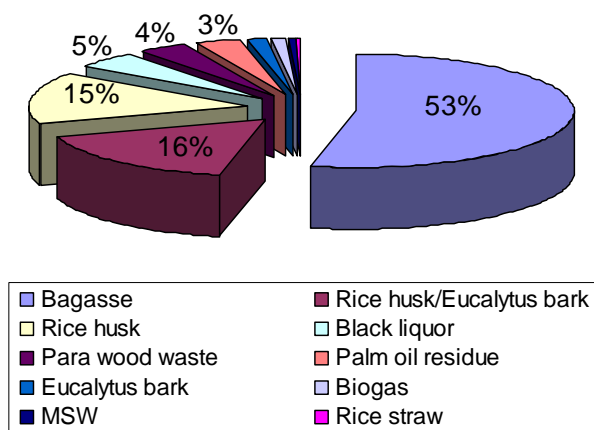


Fig. 8.4.2. Biomass Power Plants by Fuel (Grid).

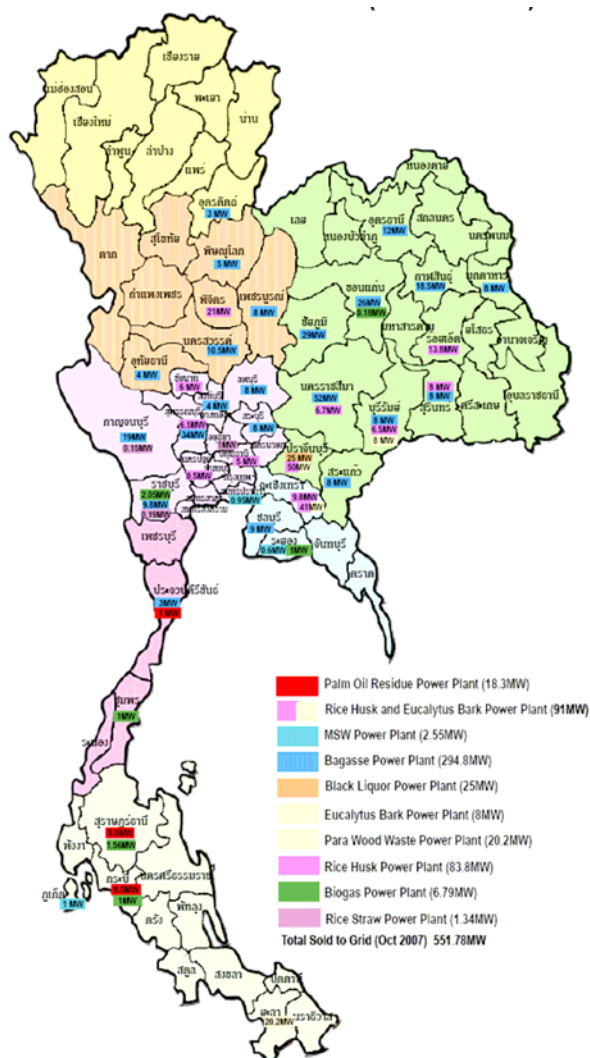


Fig. 8.4.1. Distribution of Biomass Power Plant in Thailand

Source: adapted from Energy for Environment Foundation (<http://www.efe.or.th>)

8.4.3 籾殻のガス化技術

多数のバイオマス発電所があるが、そのいくつかは、未だに従来の燃焼技術を用いて発電用蒸気の生成を行っているため、稼働効率は低い。したがって、この問題を、ガス化技術のような熱機関変換工程を用いて解決することは可能である。籾殻は精米工場から大量に入手できるだけでなく、サイズも小さく、水分が少ないため、バイオマス発電所にとって魅力的な原料の1つである。最近、エネルギー省は、地域のバイオマスガス化システム（籾殻を使用）建設の実現可能性を証明するために、カセサート大学とグレート・アルゴ社を中心とするプロジェクトに資金を提供した。このプロジェクトは、タイの国王が提唱する「足るを知る経済」を育成するために着手されたものである。Fig. 8.4.3 に示すとおり、このシステムは80 kWの電力を発電できるだけでなく、熱と肥料用のバイオマスの灰も生成する。このシステムの設計には、3段階の流動層熱分解とガス化が採用されており、Fig. 8.4.4 に示すとおり、5つの主要装置、乾燥、熱分解、ガス化、冷却システムおよびエンジン/発電機1式で構成されている。



Fig. 8.4.3. Concept of Biomass Gasification System.

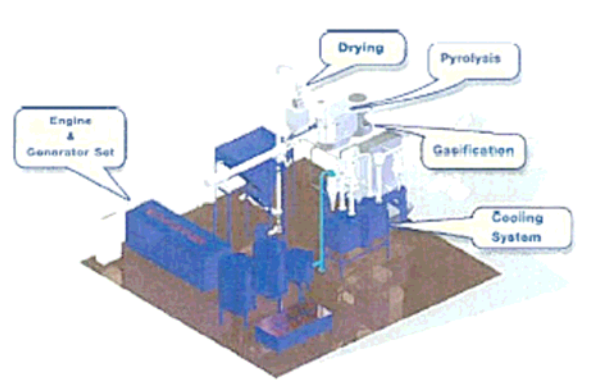


Fig. 8.4.4. Units of Gasification System.

Fig. 8.4.5 および 8.4.6 に示すとおり、このシステムは、Lamlukka Cooperative Rice Mill & Paddy Center Market Co., Ltd. の敷地内に建設され、360 時間以上の実験とテストが実施された。このシステム全体のガス化効率は 92% であり、ガス流量は $240 \text{ m}^3/\text{hr}$ ($4.5 \text{ MJ}/\text{m}^3$ の発熱量で)、籾殻消費量は $85 \text{ kg}/\text{hr}$ である。つまり、 $1.25 \text{ kg}/\text{hr}$ の籾殻で、 1 kW の電力が発電できるということである。さらに、システムから排出される残留タールの量は、ほぼ $22 \text{ mg}/\text{m}^3$ となる。経済分析面から、この 80 kW のシステムには、運転費用 1 装置当たり最大 1.79 バーツとして、最大 390 万バーツの資本投資が必要である。このシステムが、460,800 の装置/年 (3 バーツ/装置の電力コストに相当) で発電すると仮定すると、7 年間の返済期間として、純益は、56 万バーツ/年と予測される。次の段階としては、100 万 W の容量拡大へ向けた MTEC とグレート・アルゴ社との協業である。

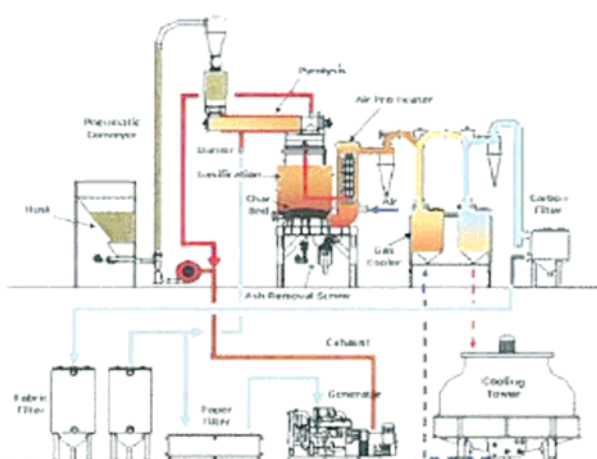


Fig. 8.4.5. Flow Diagram of Gasification System



Fig. 8.4.6. Test Run of the Complete Set

参考文献

S. Nivitchanyong, Alternative Energy Cluster, National Metal and Materials Technology Center: MTEC (siriluck@mtec.or.th)

8.5 エタノールの生産

8.5.1 エタノール生産の原料に何が適しているか

タイでは、既存のエタノール生産工場のほとんどが、原料として糖蜜を使用しているが、今後キャッサバを使用する工場は増加すると思われる。ただし、これら2つのエネルギー源となる農作物は現在でも食料とみなされ、「食料」対「燃料」の問題が発生する可能性がある。そのため、ますます多くの人々が、食用とならない農作物を代替エネルギー源として使用することを模索し始めている。特に、さまざまな農業廃棄物から排出されるリグノセルロースに注目が集まっており、第二世代リグノセルロース・バイオエタノールの時代が幕を開けた。

8.5.2 タイにおけるエタノール生産用リグノセルロース系バイオマス原料

毎年タイの農業は、藁、サトウキビのバガス、トウモロコシ茎葉/繊維および木材チップなど、農業廃棄物であるさまざまなリグノセルロース系バイオマス原料数百万トンを出している。以下の表に示すとおり、タイの二大農作物（重量換算）であるサトウキビや米は、ほとんどが北部およ

び北東部の州に集中している。

Table 8.5.1. The first four largest agricultural production in Thailand (2004).

	Sugarcane	Rice	Cassava	Maize
Production (thousand tons)	64,974	27,038	21,440	4,216
Harvested Area (thousand rai*)	7,009	63,709	6,608	6,810
Yield per rai (kilograms)	9,270	424	3,244	619

Source: Office of Agricultural Economics (2004) * 6.25 rai = 1 hectare

一般的にこれらの農業廃棄物の利用効率は低く、ほとんどの場合、環境問題の原因となっている。藁は廃棄物とみなされ、畑で焼かれるか (Fig. 8.5.1 および 8.5.2 に示すとおり)、廃棄されるか、動物の飼料などのさまざまな方法で処分される。これら大量の藁を処理するより魅力的な方法は、セルロース性エタノールの生産である。



Fig. 8.5.1. Open-air burning causes air pollution.



Fig. 8.5.2. Burning also causes soil pollution.

8.5.3 処理に関するパイオニア的な研究開発

リグノセルロースの主要成分は、セルロース、ヘミセルロースおよびリグニンであるため、発酵工程前に、単糖類を抽出する前処理がさらに必要となる。典型的な工程の場合、前処理、成分の分別、脱リグニン、酵素による加水分解と発酵など非常に複雑な SHF (酵素による加水分解と発酵を

別々に行なう方法) の手法が必要とされる。代わりに、適切な水蒸気爆砕で前処理を行うと、加水分解物が生成され、SSF (並行糖化発酵) 手法を用いれば、Fig. 8.5.3、8.5.4 および 8.5.5 のとおり、前処理と加水分解/発酵工程だけで、1つの反応器でこれを酵素で分解し、発酵させることができる。今後の目標は、タイで市販されているセルラーゼ酵素と微生物を利用した適切なSSFの追求である。

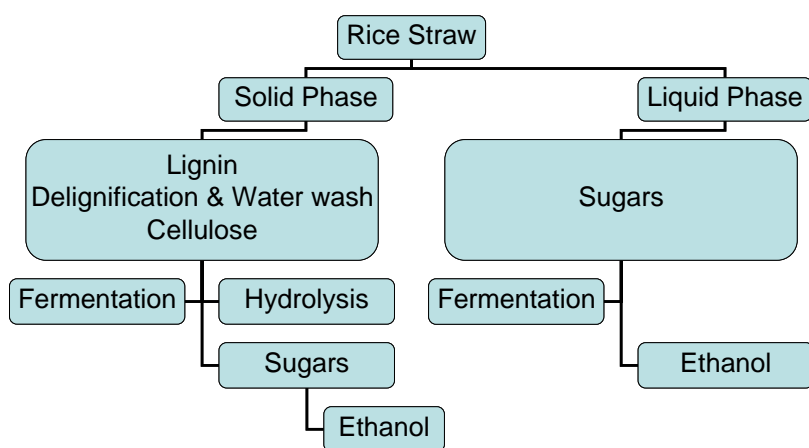


Fig. 8.5.3. Typical process of lignocellulosic ethanol production.

Source: C. Pomchaitaward *et al*, MTEC report (2007)



Fig. 8.5.4. Prototype of steam explosion unit.

藁に水蒸気爆砕法を使用した Supunburi1™ は、最小限の酵素とイースト菌を使用し、1つの反応器で、糖質をうまく回収させ、エタノール濃度を高めることができることを示している。150gの乾燥させた藁に、5分間10~25バールの蒸気圧をかけた(該当する温度はそれぞれ185°Cおよび210°C)。これより高い蒸気圧(またこれより高い温度)では、さらにヘミセルロースの可溶化に有利であったが、セルロースの可溶化には蒸気圧が強い影響を見出せなかった。糖分解物質の生成を最小限にする最適な前処理条件によって、エタノールへの糖質の効果的な発酵が可能になった。結論として、15バールで5分間の穏やかな水蒸気前処理が、最大の加水分解収率をもたらすことが判明した。



Fig. 8.5.5. Exploded rice straw.

この工程により、藁全体をエタノールへと生物変換する際の複雑さが大幅に軽減される一方、資本投資費用と、分離プロセスに要する時間も同時に短縮される。さらに、この工程には関わる有害化学処理薬品が少なく、危険な状況も少ないため、環境への影響が大幅に軽減される。最後に重要なこととして、これが、農業廃棄物管理におけるエネルギー効率を高める選択肢を提供する点である。

参考文献

- C. Pomchaitaward et al, Feasibility Study of Ethanol Production from Lignocellulosic Materials via the Steam Explosion Pretreatment, MTEC in-house project report 2007 (chaiyapp@mtec.or.th)
- S. Nivitchanyong, Alternative Energy Cluster, MTEC (siriluck@mtec.or.th)

付録

1. 東京宣言
2. 京都議定書
3. アジアの統計
4. 単位
5. 原子量
6. 熱力学的特性
7. 化石燃料の発熱量と可採年数
8. APEC の枠組み
9. 各国の目標
10. バイオマス関連の歴史
11. 各国語の辞典
12. 関連書籍

付録 1 東京宣言

A1.1 アジアのバイオマスに関する東京宣言

農林水産省が主体となって開催したバイオマス・アジア・フォーラムにおいて、アジアのバイオマスの有効利用についての宣言（アジアのバイオマに関する東京宣言）が採択された。これは、アジアのバイオマス利用について考慮すべき内容とその方向を、それまでの議論を踏まえて整理し、宣言したものである。以下に、このアジアのバイオマに関する東京宣言を示す。

アジアのバイオマスに関する東京宣言

高まるバイオマスへの期待を受け、アジアのバイオマス資源を有効に利用するためにバイオマス・アジア・フォーラムは以下の宣言を採択する。

1. バイオマス資源は再生可能かつ炭素中立であることを認識し、その利用の促進を図るべきである。
2. バイオマスの利用にあたっては、持続可能性を強調し、また、二酸化炭素削減効果を強調するべきである。
3. バイオマス資源はアジアの産業ならびに地域経済の活性化に資することを認識し、その経済効果を最大限に得られるように考慮するべきである。
4. バイオマスの利用にあたっては循環型社会の形成の可能性を含めて検討を行い、その適切な実現を進めるべきである。
5. バイオマスの利用には適切な技術の開発と導入が有効であることを認識し、適切な助成と補助による関連技術の発展を促進するべきである。

6. バイオマス資源の有効利用を促進するために、アジアの国々のメンバーによる協議会をおき、自立的な活動を進めるべきである。

7. バイオマス資源の利用は、各国の状況の改善に寄与すべきであり、よって、貧困問題の解決、自然破壊の防止、疫病の発生抑制、生活の質の向上に寄与する利用を促進し、このような利用を実現する政策を進めるべきである。

A1.2 バイオマス・アジア・ワークショップとバイオマス・アジア・フォーラム

アジアのバイオマス関係者の間で情報共有を進め、相互理解を深めるためのネットワークの構築が重要である。この動きには2つの大きな流れがある。ひとつは、日本の農林水産省が中心となって開催したバイオマス・アジア・フォーラム、もうひとつは、同じく日本の産業技術総合研究所や国際農林水産業研究センターが中心となって文部科学省の助成で進めているバイオマスASEANプロジェクトである。2004年に、両者のプロジェクトが別々に始められたが、類似の検討を行っていることが確認されたので、合同で第1回バイオマス・アジア・ワークショップを開催することとし、2005年1月にこれを東京とつくばで開催した。2005年12月には第2回バイオマス・アジア・ワークショップがタイのバンコクで開催され、バイオマス・アジア・フォーラムは2006年1月に東京で開催された。これらのワークショップとフォーラムを通して、アジアの国々のバイオマスに関する状況が確認され、また、その有効利用の目的が議論された。この流れを受けて2006年11月の第3回バイオマス・アジア・ワークショップにおいてネットワークの議論がなされた。この流れをFig. 1に示す。

さらに、第4回のバイオマス・アジア・ワークショップは、2007年11月にマレーシアのシャー・アラムで開催された。第5回は中国で開催の予定である。

最近のバイオマス関連の動向を知る意味で、第4回のワークショップのプログラムを併せて示す。

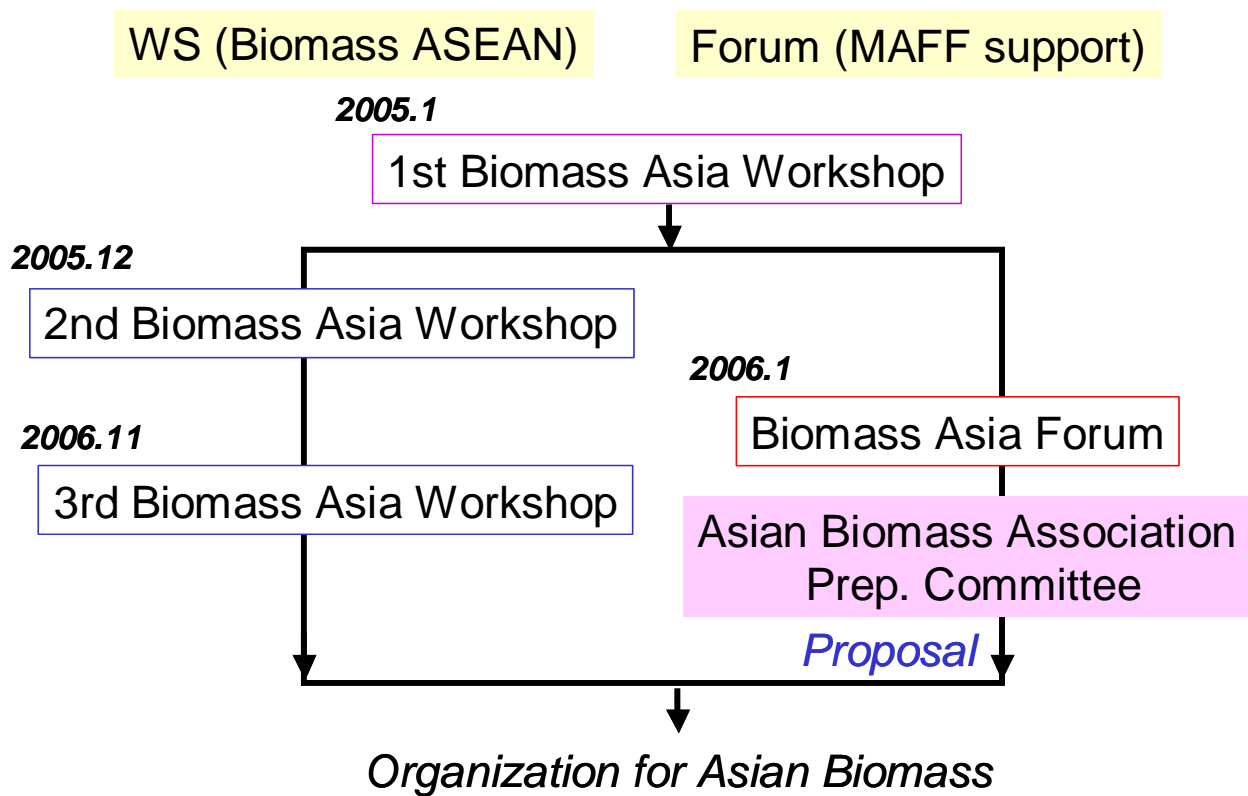


Fig. A1.2.1 Events regarding the networking on Asian Biomass utilization.

Fourth Biomass-Asia Workshop

Date: 20-22 November, 2007

Venue: Grand BlueWave Hotel Shah Alam

Perbandaran, Seksyen 14, 40000 Shah Alam, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

Day 1 (Nov. 20, 2007)

0830-0900 Registration

Opening Remarks

0900-0915 Tatsuo Katsura

Senior Vice President, AIST, on behalf of Representative of Biomass-Asia Research Consortium,
Japan

0915-0930 Kunio Oguri

Deputy Director General, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat,
MAFF, Japan

0930-1000 Break

Special Lecture

Chair: Zainal Abidin Mohd Yusuf (Vice President, SIRIM, Malaysia)

1000-1030 Lignocellulose refinery system must be realized for global environment and
economy

Kenji Iiyama

President, JIRCAS, Japan

1030-1100 Coffee Break

Plenary Lecture

Chair: Yasuyuki Yagi (Councillor, International Affairs Dept., AIST, Japan)

1100-1125 Food Security with Biofuels: FAO Perspective

Abdolreza Abbassian

Secretary of the Intergovernmental Group on Grains, FAO, UN

1125-1150 Biomass for Energy Generation in Malaysia

Anuar Abdul Rahman

CEO of Pusat Tenaga Malaysia (PTM)

1150-1215 Biomass for Material Application

Peesamai Jenvanitpanjakul

Deputy Governor, Thailand Institute of Scientific and Technological Research(TISTR),
Thailand

1215-1240 Policy and Legislation on Biofuel Utilisation

Datu Dr. Michael Dosim Lunjew

Secretary General, Ministry of Plantation Industries and Commodities Malaysia

1240-1420 Lunch / Poster Session

Keynote Speech

1430-1500 H.E. Dato' Sri Dr. Lim Keng Yaik

Minister of Energy, Water and Communications, Malaysia

Future Prospect of Biomass Utilisation in Asian Countries

Chair: Masayuki Kamimoto (Research Coordinator, AIST, Japan)

1500-1525 Biomass-Asia Project-Second Stage: Research and Technological Development for
Sustainable Biomass Utilization in Asian Countries

Kinya Sakanishi

Representative of Research Core for Asian Biomass Energy, AIST, Japan

1525-1550 The Road Map of Chinese Biomass Energy Development

Haibin Li

Guangzhou Institute of Energy Conversion (GIEC),

Chinese Academy of Sciences (CAS), China

1550-1610 Coffee Break

1610-1635 Rice-Sugarcane Complex Model

Klanarong Sriroth

Associate Professor, Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Thailand

1635-1700 Palm Complex Model

Wahono Sumaryono

Deputy Chairman for Agroindustry and Biotechnology,

Agency for Assessment and Application of Technology (BPPT), Indonesia

- Panel Discussion -

Asian Partnership on Sustainable Environmentally Benign Biomass Production and Utilisation

Moderator: Yukihiro Matsumura (Professor, Hiroshima University, Japan)

1700-1830

< Panelists >

China: The Development of Biofuels in China

Dehua Liu

Professor, Director of Institute of Applied Chemistry, Department of Chemical Engineering, Tsinghua University

Indonesia : Biofuel Development in Indonesia

Petrus Panaka

Professor, Project Development Advisor, PT Gikoko Kogyo Indonesia

Malaysia : Sustainable Biomass Production and Utilisation

- Profit, People and Planet -

Mohamad Ali Hassan

Dean, Faculty of Biotechnology and Biomolecular Sciences, University Putra Malaysia (UPM)

Philippines: Non-fossil Energy

Luis F. Razon

Director, University Research Coordination Office, Associate Professor, Department of Chemical Engineering, De La Salle University

Thailand : Asian Partnership on Sustainable Environmentally Benign Biomass Production and Utilization

Nuwong Chollacoop

National Metal and Materials Technology Center (MTEC),

National Science and Technology Development Agency (NSTDA)

Vietnam : Seaweed: Potential Biomass for Ethanol Production

Truong Nam Hai

Deputy Director, Institute of Biotechnology,

Vietnamese Academy of Science and Technology (VAST)

2000-2130 Reception

hosted by Dato' Dr. Halim Man

Secretary General for Ministry of Energy, Water and Communications, Malaysia

Day 2 (Nov. 21, 2007)

<Room 1>

Palm Oil Energy Complex Model

Chair:

Chen Sau Soon (SIRIM, Malaysia)

Tomoaki Minowa (AIST, Japan)

0900-0920 Palm Oil Industry in Malaysia

Dato' Dr. Choo Yuen May,

Deputy Director-General, Malaysian Palm Oil Board

0920-0940 Electricity Generation from Palm Oil Mills in Indonesia

(extended abstract)

Soni Solistia Wirawan

Head of Institute for Engineering

and Technology System Design

(Engineering Center), BPPT,

Indonesia

0940-1000 Palm Oil Energy Complex and CDM

Yoshihito Shirai
Professor, Graduate School of Life
Science and Systems Engineering,
Kyushu Institute of Technology,
Japan

1000-1020 Potential of Oil Palm Trunk as a Source for Ethanol Production

Ryohei Tanaka
FFPRI, Japan
co-authored by Yutaka Mori (JIRCAS)
Mohd Nor Mohd Yusoff (FRIM)
Othman Sulaiman (USM)
Shu Yoshida (Sojitz Machinery Corporation)

1020-1040 Coffee Break

1040-1100 Biomass Plastics from Palm Oil Mill Effluent in Malaysia

Mohamad Ali Hassan
Dean, Faculty of Biotechnology
and Biomolecular Sciences,
University Putra Malaysia (UPM),
Malaysia

1100-1120 Co-firing of Biomass with Coal for Power Generation

Suthum Patumsawad
Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's
Institute of Technology North
Bangkok (KMITNB), Thailand

1120-1140 Benchmarking of Biodiesel Fuel Standards for Vehicles in East Asia

Shinichi Goto
Director, Research Center for New
Biomass Technology Research

Center, AIST, Japan

1140-1200 Production of Second-Generation Biofuels from Palm Wastes

Shinichi Yano

Senior Research Scientist,

Biomass Technology Research

Center, AIST, Japan

1200-1220 Discussion

<Room 2>

Utilisation of Agriculture and Wood Wastes

Chair :

Guangwen Xu (CAS, China)

Takahiro Yoshida (FFPRI, Japan)

Brazil: Brazilian Present and Future Ethanol Production - Biomass Ethanol Potential

Elba P.S.Bon

Associate Professor in Biochemistry,

Chemistry Institute,

Federal University of Rio de Janeiro

Cambodia: Biomass in Cambodia

Lieng Vuthy

Deputy Director, Department of

Energy Techique, Ministry of

Industry, Mines and Energy

China: High Efficient Conversion of Cellulosic Process Residue into Middle-Caloric Gas

Guangwen Xu

Professor, Institute of Process Engineering, CAS

Indonesia: Agricultural and Wood Waste Potentials and Utilization in Indonesia

Unggul Priyanto

Director, Energy Resources Development Technology Center, BPPT

Japan: Biomass Refinery Systems -Case Study at Miyako Island, Japan-

Yoshiyuki Shinogi

Head, Laboratory of Farmland

Engineering, Department of Land and Water Resources, National Institute for Rural
Engineering, NARO

1020-1040 Coffee Break

Laos: Brief Report of Biomass in LAO PDR

Bouathep Malaykham

Chief of Electric Power Management

Division, Department of Electricity,

Ministry of Energy and Mines

Myanmar: Anhydrous Ethanol Production

Su Su Hlaing

Lecturer of Department of Chemical

Engineering, Mandalay

Technological University

Philippines : Outlook of Biomass Industry in the Philippines

Ruby B. De Guzman

Supervising Science Research

Specialist Alternative Fuels and

Energy Technology Division,

Department of Energy

Thailand : Zero Waste Agriculture for Jatropha Plantation

Siriluck Nivitchanyong
Assistant Director, MTEC,
Alternative Energy Program Host,
NSTDA

Vietnam : Utilization of Agricultural and Wood Wastes in Vietnam
Tran Dinh Man
Deputy Director, Institute of
Biotechnology, VAST

Discussion
Moderator's Summary
Moderator: Yukihiro Matsumura
(Hiroshima University, Japan)

1220-1330 Lunch / Poster Session

For Sustainable Biomass Utilization
Chair: Yoshihito Shirai (Professor, Kyushu Institute of Technology, Japan)

1330-1355 Asia Biomass Community

Issei Sawa
Senior Manager, Liquid Biofuel, New Energy Business Unit, Mitsubishi Corporation, Japan

1355-1420 Financing for Biomass and Renewable Energy Projects

Mohd Nordin Che Omar
Manager of High Technology, representing Chairman of Bank Pembangunan Malaysia

1420-1445 Evaluation of Environmental Impacts of Biomass Utilisation by LCA

Masayuki Sagisaka
Deputy Director, Life Cycle Assessment Research Center, AIST, Japan

1445-1510 Improving Drought and Salt Stress Tolerance in Plants by Gene Transfer

Yasunari Fujita
Senior researcher, Biological Resources Division, JIRCAS, Japan

1530-1600 Coffee Break

Way Forward Session

-Panel Discussion-

Moderator: Shinya Yokoyama (Professor, The University of Tokyo, Japan)

1600-1730 Moderator's Summary : Energy Situation in Asian Region

<Panelists>

Haibin Li, China

Wahono Sumaryono, Indonesia

Kinya Sakanishi, Japan

Mohamad Ali Hassan, Malaysia

Peesamai Jenvanitpanjakul, Thailand

Tran Dinh Man, Vietnam

for the 5th Biomass-Asia Workshop

Closing Remarks

1730-1740 Masakazu Yamazaki

Vice President, AIST, Japan

1740-1750 Chen Sau Soon

Senior General Manager, Environment & Bioprocess Technology Centre

SIRIM, Malaysia

2000-2130 Workshop Dinner hosted by AIST

Day 3 (Nov. 22, 2007)

Technical tour

1. Waste to Energy Plant, Banting
2. Biodiesel Palm Oil Mill, Labu

A1.3 アジア・バイオマス協議会

上記のアジアのバイオマスの有効利用についての東京宣言の中に含まれているネットワークの構築を踏まえて、バイオマス・アジア・フォーラムでは、アジア・バイオマス協議会の提案がなされた。

これは、これまでのアジアのバイオマスに関する共同研究が、予算に基づいたプログラムによるもので、そのプログラムが終了すると活動そのものが終了してしまうのに対して、予算に依存しないネットワークを構築したい、という考えに基づくものである。例えば、農林水産省のバイオマス・アジア・フォーラムも永続的な予算の裏付けがあるわけではなく、文部科学省のバイオマスASEANプロジェクトも3年予算であった。これらの予算が終わった後に、ここまで気づいたネットワークが無ならず、活動が継続されることが求められているため、これに対応した協議会の枠組みを構築する検討を進めることが決められた。

具体的には、予算がないためにボランティアベースの活動として、それでも可能な態勢を検討する準備委員会を置くこととした。ネットワークの名前をアジア・バイオマス協議会（仮称）とし、基本的な方針として以下を決定した。

- ・アジア・バイオマス協議会は、ボランティアベースの中立的で非政治的な団体とする。
- ・個人会員と団体会員から構成され、運営委員会、事務局を置き、必要に応じてワーキンググループを置く。
- ・活動予算は会費とし、会費は各国の一人当たりGDPに基づいて運営委員会で決定する。
- ・活動内容は、最低限としてメーリングリストの運営とホームページの管理を行う。予算が獲得できれば小冊子の発行、バイオマス・アジア会議の開催、会員の提案による他の活動を行う。

準備委員会のメンバーは、フォーラムの参加者のうち、日本を含む9カ国から1名ずつのメンバーを選び、日本代表の横山東京大学教授を座長として選定した。なお、準備委員会の事務作業は、横山準備委員会座長が運営委員長を務めている研究グループSETAが請け負うこととした。

さらに、この準備委員会は2008年3月に、正式にアジア・バイオマス協議会を立ち上げることとした。この時の合意事項を以下に示す。

Agreement of the Asian Biomass Association

1. This association should be known as the “Asian Biomass Association”, and abbreviated as “ABA”. It is a framework network based on voluntary activities and shall be a neutral and apolitical association.
2. The purpose of this association is to achieve effective utilization of Asian biomass based on the Tokyo Declaration on Asian Biomass. For this purpose, the association manages its homepage and the mailing list of the members.
3. The members of the association are a person or a group from Asian countries who are interested in the purpose of this association.
4. This association has the following bodies.
 - Steering Committee
 - Management Committee
 - Working Groups
5. The Steering Committee is composed of representatives from Asian countries. The number of the representatives is one for a country. The representative of a country is decided by the discussion among the members of the country’s nationality.
6. The Organization Committee has a Chair who is selected by election among the members of the committee. The duration of the Chairmanship is 2 years, and re-election is limited to 2 times.
7. The Organization Committee nominates members of the Management Committee.
8. The Organization Committee decides the activities of the association other than those shown above, and entrusts it to the Management Committee, and other parties. The Organization Committee decides the place of the office of the Association.
9. The Organization Committee starts and terminates the Working Groups for the activities of

the association.

10. The Association Members includes personal members and group members. The joining and removal of a member needs approval by the Organizing Committee.

11. The membership fee is decided by the Organization Committee.

12. Amendment of this agreement requires the consent of 2/3 of its members.

また、メーリングリストの管理とホームページの管理は日本エネルギー学会が請け負うこととした。各国の運営委員会メンバーを Table A1.3.1 に示す。

Table A1.3.1 Steering Committee members

Country	Steering Committee member
Japan	Prof. Shin-ya Yokoyama*
Malaysia	Prof. Mohamad Ali Hassan
Philippines	Dr. Jessie Cansanay Elauria
Indonesia	Dr. Petrus Panaka
Vietnam	Dr. Hai Nam Truong
China	Prof. Dehua Liu
Thailand	Dr. Paritud Bhandhubanyong
Korea	Dr. Jin-Suk Lee
Taiwan	Prof. Tzay-An Shiau
Laos	Mr. Bouathep Malaykham

付録 2 京都議定書

A2.1 気候変動に関する国際連合枠組条約

平成六年六月二十一日

条約第六号

気候変動に関する国際連合枠組条約をここに公布する。

気候変動に関する国際連合枠組条約

この条約の締約国は、

地球の気候の変動及びその悪影響が人類の共通の関心事であることを確認し、

人間活動が大気中の温室効果ガスの濃度を著しく増加させてきていること、その増加が自然の温室効果を増大させていること並びにこのことが、地表及び地球の大気を全体として追加的に温暖化することとなり、自然の生態系及び人類に悪影響を及ぼすおそれがあることを憂慮し、

過去及び現在における世界全体の温室効果ガスの排出量の最大の部分を占めるのは先進国において排出されたものであること、開発途上国における一人当たりの排出量は依然として比較的少ないこと並びに世界全体の排出量において開発途上国における排出量が占める割合はこれらの国の社会的な及び開発のためのニーズに応じて増加していくことに留意し、

温室効果ガスの吸収源及び貯蔵庫の陸上及び海洋の生態系における役割及び重要性を認識し、

気候変動の予測には、特に、その時期、規模及び地域的な特性に関して多くの不確実性があることに留意し、

気候変動が地球的規模の性格を有することから、すべての国が、それぞれ共通に有しているが

差異のある責任、各国の能力並びに各国の社会的及び経済的状况に応じ、できる限り広範な協力を
を行うこと及び効果的かつ適当な国際的対応に参加することが必要であることを確認し、

千九百七十二年六月十六日にストックホルムで採択された国際連合人間環境会議の宣言の関
連規定を想起し、

諸国は、国際連合憲章及び国際法の諸原則に基づき、その資源を自国の環境政策及び開発政策
に従って開発する主権的権利を有すること並びに自国の管轄又は管理の下における活動が他国
の環境又はいずれの国の管轄にも属さない区域の環境を害さないことを確保する責任を有する
ことを想起し、

気候変動に対処するための国際協力における国家の主権の原則を再確認し、

諸国が環境に関する効果的な法令を制定すべきであること、環境基準、環境の管理に当 たつ
ての目標及び環境問題における優先度はこれらが適用される環境及び開発の状況を反 映すべき
であること、並びにある国の適用する基準が他の国(特に開発途上 国)にとって 不適當なもの
となり、不当な経済的及び社会的損失をもたらすものとなるおそれがあるこ とを認め、

国際連合環境開発会議に関する千九百八十九年十二月二十二日の国際連合総会決議第二 百二
十八号(第四十四回会期)並びに人類の現在及び将来の世代のための地球的規模の気 候の保護
に関する千九百八十八年十二月六日の国際連合総会決議第五十三号(第四十三回 会期)、千九百
八十九年十二月二十二日の同決議第二百七号(第四十四回会期)、千九百 九十年十二月二十一日
の同決議第二百十二号(第四十五回会期)及び千九百九十一年十二 月十九日の同決議第百六十
九号(第四十六回会期)を想起し、

海面の上昇が島及び沿岸地域(特に低地の沿岸地域)に及ぼし得る悪影響に関する千九 百八
十九年十二月二十二日の国際連合総会決議第二百六号(第四十四回会期)の規定及び 砂漠化に
対処するための行動計画の実施に関する千九百八十九年十二月十九日の国際連合 総会決議第百
七十二号(第四十四回会期)の関連規定を想起し、

更に、千九百八十五年のオゾン層の保護のためのウィーン条約並びに千九百九十年六月 二十

九日に調整され及び改正された千九百八十七年のオゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書（以下「モントリオール議定書」という）を想起し、

千九百九十年十一月七日に採択された第二回世界気候会議の閣僚昼言に留意し、

多くの国が気候変動に関して有益な分析を行っていること並びに際連合の諸機関（特に、世界気象機関、国際連合環境計画）その他の国際機関及び政府間機関が科学的研究の成果の交換及び研究の整について重要な貢献を行っていることを意識し、

気候変動を理解し及びこれに対処するために必要な措置は、関連する科学、技術及び経済の分野における考察に基礎を置き、かつ、これらの分野において新たに得られた知見に照らして絶えず再評価される場合には、環境上、社会上及び経済上最も効果的なものになことを認め、

気候変動に対処するための種々の措置は、それ自体経済的に正当し得ること及びその他の環境問題の解決に役立ち得ることを認め、

先進国が、明確な優先順位に基づき、すべての温室効果ガスを考慮に入れ、かつ、それらのガスがそれぞれ温室効果の増大に対して与える相対的な影響を十分に勘案した包括的な対応戦略（地球的、国家的及び合意がある場合には地域的な規模のもの）に向けた第一歩として、直ちに柔軟に行動することが必要であることを認め、

更に、標高の低い島しょ国その他の島しょ国、低地の沿岸地域、乾燥地城若しくは半乾燥地域又は洪水、干ばつ若しくは砂漠化のおそれのある地域を有する国及びぜい弱な山岳の生態系を有する開発途上国は、特に気候変動の悪影響を受けやすいことを認め、

経済が化石燃料の生産、使用及び輸出に特に依存している国（特に開発途上国）について、温室効果ガスの排出抑制に関してとられる措置の結果特別な困難が生ずることを認め、

持続的な経済成長の達成及び貧困の撲滅という開発途上国の正当かつ優先的な要請を十分に考慮し、気候変動への対応については、社会及び経済の開発に対する悪影響を回避するため、これらの開発との間で総合的な調整が図られるべきであることを確認し、

すべての国（特に開発途上国）が社会及び経済の持続可能な開発の達成のための資源の取得の機会を必要としていること、並びに開発途上国がそのような開発の達成という目標に向かって前進するため、一層高いエネルギー効率の達成及び温室効果ガスの排出の一般的な抑制の可能性（特に、新たな技術が経済的にも社会的にも有利な条件で利用されることによるそのような可能性）をも考慮に入れつつ、そのエネルギー消費を増加させる必要があることを認め、

現在及び将来の世代のために気候系を保護することを決意して、

次のとおり協定した。

第一条 定義（注）

注 各条の表題は、専ら便宜のために付するものである。

この条約の適用上、

「気候変動の悪影響」とは、気候変動に起因する自然環境又は生物相の変化であって、自然の及び管理された生態系の構成、回復力若しくは生産力、社会及び経済の機能又は人の健康及び福祉に対し著しく有害な影響を及ぼすものをいう。

「気候変動」とは、地球の大気の組成を変化させる人間活動に直接又は間接に起因する気候の変化であって、比較可能な期間において観測される気候の自然な変動に対して追加的に生ずるものをいう。

「気候系」とは、気圏、水圏、生物圏及び岩石圏の全体並びにこれらの間の相互作用をいう。

「排出」とは、特定の地域及び期間における温室効果ガス又はその前駆物質の大気中への放出をいう。

「温室効果ガス」とは、大気を構成する気体（天然のものであるか人為的に排出されるものであるかを問わない。）であって、赤外線を吸収し及び再放射するものをいう。

「地域的な経済統合のための機関」とは、特定の地域の主権国家によって構成され、この条約又はその議定書が規律する事項に関して権限を有し、かつ、その内部手続に従ってこの条約若しくはその議定書の署名、批准、受諾若しくは承認又はこの条約若しくはその議定書への加入が正当に委任されている機関をいう。

「貯蔵庫」とは、温室効果ガス又はその前駆物質を貯蔵する気候系の構成要素をいう。

「吸収源」とは、温室効果ガス、エアロゾル又は温室効果ガスの前駆物質を大気中から除去する作用、活動又は仕組みをいう。

「発生源」とは、温室効果ガス、エアロゾル又は温室効果ガスの前駆物質を大気中に放出する作用又は活動をいう。

第二条 目的

この条約及び締約国会議が採択する法的文書には、この条約の関連規定に従い、気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼすこととならない水準において大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させることを究極的な目的とする。そのような水準は、生態系が気候変動に自然に適応し、食糧の生産が脅かされず、かつ、経済開発が持続可能な態様で進行することができるような期間内に達成されるべきである。

第三条 原則

締約国は、この条約の目的を達成し及びこの条約を実施するための措置をとるに当たり、特に、次に掲げるところを指針とする。

締約国は、衡平の原則に基づき、かつ、それぞれ共通に有しているが差異のある責任及び各国の能力に従い、人類の現在及び将来の世代のために気候系を保護すべきである。したがって、先進締約国は、率先して気候変動及びその悪影響に対処すべきである。

開発途上締約国（特に気候変動の悪影響を著しく受けやすいもの）及びこの条約によって過重又は異常な負担を負うこととなる締約国（特に開発途上締約国）の個別のニーズ及び特別な事情について十分な考慮が払われるべきである。

締約国は、気候変動の原因を予測し、防止し又は最小限にするための予防措置をとるとともに、気候変動の悪影響を緩和すべきである。深刻な又は回復不可能な損害のおそれがある場合には、科学的な確実性が十分でないことをもって、このような予防措置とることを延期する理由とすべきではない。もっとも、気候変動に対処するための政策及び措置は、可能な限り最小の費用によって地球的規模で利益がもたらされるように費用対効果の大きいものとするということについても考慮を払うべきである。このため、これらの政策及び措置は、社会経済状況の相違が考慮され、包括的なものであり、関連するすべての温室効果ガスの発生源、吸収源及び貯蔵庫並びに適応のための措置を網羅し、かつ、経済のすべての部門を含むべきである。気候変動に

対処するための努力は、関心を有する締約国の協力によっても行われ得る。

締約国は、持続可能な開発を促進する権利及び責務を有する。気候変動に対処するための措置をとるためには経済開発が不可欠であることを考慮し、人に起因する変化から気候系を保護するための政策及び措置については、各締約国の個別の事情に適合したものと し、各国の開発計画に組み入れるべきである。

締約国は、すべての締約国（特に開発途上締約国）において持続可能な経済成長及び開発をもたらし、もって締約国が一層気候変動の問題に対処することを可能にするような協力的かつ開放的な国際経済体制の確立に向けて協力すべきである。気候変動に対処するためにとられる措置（一方的なものを含む。）は、国際貿易における恣意的若しくは不当な差別の手段又は偽装した制限となるべきではない。

第四条 約束

すべての締約国は、それぞれ共通に有しているが差異のある責任、各国及び地域に特有の開発の優先順位並びに各国特有の目的及び事情を考慮して、次のことを行う。

(a) 締約国会議が合意する比較可能な方法を用い、温室効果ガス（モントリオール議定書によって規制されているものを除く。）について、発生源による人為的な排出及び吸収源による除去に関する自国の目録を作成し、定期的に更新し、公表し及び第十二条の規定に従って締約国会議に提供すること。

(b) 自国の（適当な場合には地域の）計画を作成し、実施し、公表し及び定期的に更新すること。この計画には、気候変動を緩和するための措置（温室効果ガス（モントリオール議定書によって規制されているものを除く。）の発生源による人為的な排出及び吸収源による除去を対象とするもの）及び気候変動に対する適応を容易にするための措置を含めるものとする。

(c) エネルギー、運輸、工業、農業、林業、廃棄物の処理その他すべての関連部門において、温室効果ガス（モントリオール議定書によって規制されているものを除く。）の人為的な排出を抑制し、削減し又は防止する技術、慣行及び方法の開発、利用及び普及（移転を含む。）を促進し、並びにこれらについて協力すること。

(d) 温室効果ガス（モントリオール議定書によって規制されているものを除く。）の吸収源及び貯蔵庫（特に、バイオマス、森林、海その他陸上、沿岸及び海洋の生態系）の持続可能な管理を促進すること並びにこのような吸収源及び貯蔵庫の保全（適当な場合には強化）を促進し並びにこれらについて協力すること。

(e) 気候変動の影響に対する適応のための準備について協力すること。沿岸地域の管理、水資

源及び農業について、並びに干ばつ及び砂漠化により影響を受けた地域（特にアフリカにおける地域）並びに洪水により影響を受けた地域の保護及び回復について、適当かつ総合的な計画を作成すること。

(f) 気候変動に関し、関連する社会、経済及び環境に関する自国の政策及び措置において可能な範囲内で考慮を払うこと。気候変動を緩和し又はこれに適応するために自国が実施する事業又は措置の経済、公衆衛生及び環境に対する悪影響を最小限にするため、自国が案出し及び決定する適当な方法（例えば影響評価）を用いること。

(g) 気候変動の原因、影響、規模及び時期並びに種々の対応戦略の経済的及び社会的影響についての理解を増進し並びにこれらについて残存する不確実性を減少させ又は除去することを目的として行われる気候系に関する科学的、技術的、社会経済的研究その他の研究、組織的観測及び資料の保管制度の整備を促進し、並びにこれらについて協力すること。

(h) 気候系及び気候変動並びに種々の対応戦略の経済的及び社会的影響に関する科学上、技術上、社会経済上及び法律上の情報について、十分な、開かれた及び迅速な交換を促進し、並びにこれらについて協力すること。

(i) 気候変動に関する教育、訓練及び啓発を促進し、これらについて協力し、並びにこれらへの広範な参加（民間団体の参加を含む。）を奨励すること。

(j) 第十二条の規定に従い、実施に関する情報を締約国会議に送付すること。

附属書1に掲げる先進締約国その他の締約国（以下「附属書1の締約国」という。）は、特に、次に定めるところに従って約束する。

(a) 附属書1の締約国は、温室効果ガス的人為的な排出を抑制すること並びに温室効果ガスの吸収源及び貯蔵庫を保護し及び強化することによって気候変動を緩和するための自国の政策を採用し、これに沿った措置をとる（注）。これらの政策及び措置は、温室効果ガス的人為的な排出の長期的な傾向をこの条約の目的に沿って修正することについて、先進国が率先してこれを行っていることを示すこととなる。二酸化炭素その他の温室効果ガス（モントリオール議定書によって規制されているものを除く。）の人為的な排出の量を千九百九十年代の終わりまでに従前の水準に戻すことは、このような修正に寄与するものであることが認識される。また、附属書1の締約国の出発点、対処の方法、経済構造及び資源的基盤がそれぞれ異なるものであること、強力かつ持続可能な経済成長を維持する必要があること、利用可能な技術その他の個別の事情があること、並びにこれらの締約国がこの条約の目的のための世界的な努力に対して衡平かつ適当な貢献を行う必要があることについて、考慮が払われる。附属書1の締約国が、これ

らの政策及び措置を他の締約国と共同して実施すること並びに他の締約国によるこの条約の目的、特に、この(a)の規定の目的の達成への貢献について当該他の締約国を支援することもあり得る。注 これらの政策及び措置には、地域的な経済統合のための機関がとるものが含まれる。

(b) (a)の規定の目的の達成を促進するため、附属書1の締約国は、(a)に規定する政策及び措置並びにこれらの政策及び措置をとった結果(a)に規定する期間について予測される二酸化炭素その他の温室効果ガス(モントリオール議定書によって規制されているものを除く。)の発生源による人為的な排出及び吸収源による除去に関する詳細な情報を、この条約が自国について効力を生じた後六箇月以内に及びその後は定期的に、第十二条の規定に従って送付する。その送付は、二酸化炭素その他の温室効果ガス(モントリオール議定書によって規制されているものを除く。)の人為的な排出の量を個別に又は共同して千九百九十年の水準に戻すという目的をもって行われる。締約国会議は、第七条の規定に従い、第一回会合において及びその後は定期的に、当該情報について検討する。

(c) (b)の規定の適用上、温室効果ガスの発生源による排出の量及び吸収源による除去の量の算定に当たっては、入手可能な最良の科学上の知識(吸収源の実効的な能力及びそれぞれの温室効果ガスの気候変動への影響の度合に関するものを含む。)を考慮に入れるべきである。締約国会議は、この算定のための方法について、第一回会合において検討し及び合意し、その後は定期的に検討する。

(d) 締約国会議は、第一回会合において、(a)及び(b)の規定の妥当性について検討する。その検討は、気候変動及びその影響に関する入手可能な最良の科学的な情報及び評価並びに関連する技術上、社会上及び経済上の情報に照らして行う。締約国会議は、この検討に基づいて適当な措置((a)及び(b)に定める約束に関する改正案の採択を含む。)をとる。締約国会議は、また、第一回会合において、(a)に規定する共同による実施のための基準に関する決定を行う。(a)及び(b)の規定に関する二回目の検討は、千九百九十八年十二月三十一日以前に行い、その後は締約国会議が決定する一定の間隔で、この条約の目的が達成されるまで行う。

(e) 附属書1の締約国は、次のことを行う。

(i) 適当な場合には、この条約の目的を達成するために開発された経済上及び行政上の手段を他の附属書1の締約国と調整すること。

(ii) 温室効果ガス(モントリオール議定書によって規制されているものを除く。)の人為的な排出の水準を一層高めることとなるような活動を助長する自国の政策及び慣行を特定し及び定期的に検討すること。

(f) 締約国会議は、関係する締約国の承認を得て附属書1及び附属書[2]の一覧表の適当な

改正について決定を行うために、千九百九十八年十二月三十一日以前に、入手可能な情報について検討する。

(g) 附属書1の締約国以外の締約国は、批准書、受諾書、承認書若しくは加入書において又はその後いつでも、寄託者に対し、自国が(a)及び(b)の規定に拘束される意図を有する旨を通告することができる。寄託者は、他の署名国及び締約国に対してその通告を通報する。

附属書[2]に掲げる先進締約国（以下「附属書[2]の孫約国」という。）は、開発途上締約国が第十二条1の規定に基づく義務を履行するために負担するすべての合意された費用に充てるため、新規のかつ追加的な資金を供与する。附属書[2]の締約国は、また、1の規定の対象とされている措置であって、開発途上締約国と第十一条に規定する国際的組織との間で合意するものを実施するためのすべての合意された増加費用を負担するために開発途上締約国が必要とする新規のかつ追加的な資金（技術移転のためのものを含む。）を同条の規定に従って供与する。これらの約束の履行に当たっては、資金の流れの妥当性及び予測可能性が必要であること並びに先進締約国間の適当な責任分担が重要であることについて考慮を払う。

附属書[2]の締約国は、また、気候変動の悪影響を特に受けやすい開発途上締約国がそのような悪影響に適応するための費用を負担することについて、当該開発途上締約国を支援する。

附属書[2]の締約国は、他の締約国（特に開発途上締約国）がこの条約を実施することができるようになるため、適当な場合には、これらの他の締約国に対する環境上適正な技術及びノウハウの移転又は取得の機会の提供について、促進し、容易にし及び資金を供与するための実施可能なすべての措置をとる。この場合において、先進締約国は、開発途上締約国の固有の能力及び技術の開発及び向上を支援する。技術の移転を容易にすることについてのこのような支援は、その他の締約国及び機関によっても行われ得る。

締約国会議は、附属書1の締約国のうち市場経済への移行の過程にあるものによる2の規定に基づく約束の履行については、これらの締約国の気候変動に対処するための能力を高めるために、ある程度の弾力的適用（温室効果ガス（モントリオール議定書によって規制されているものを除く。）の人為的な排出の量の基準として用いられる過去の水準に関するものを含む。）を認めるものとする。

開発途上締約国によるこの条約に基づく約束の効果的な履行の程度は、先進締約国によるこの条約に基づく資金及び技術移転に関する約束の効果的な履行に依存しており、経済及び社会の開発並びに貧困の撲滅が開発途上締約国にとって最優先の事項であることが十分に考慮される。

締約国は、この条に規定する約束の履行に当たり、気候変動の悪影響又は対応措置の実施による影響（特に、次の(a)から(i)までに掲げる国に対するもの）に起因する開発途上締約国の個別のニーズ及び思念に対処するためにこの条約の下でとるべき措置（資金供与、保険及び技術移転に関するものを含む。）について十分な考慮を払う。（a）島しょ国

(b) 低地の沿岸地域を有する国

(c) 乾燥地域、半乾燥地域、森林地域又は森林の衰退のおそれのある地域を有する国

(d) 自然災害が起こりやすい地域を有する国

(e) 干ばつ又は砂漠化のおそれのある地域を有する国

(f) 都市の大気汚染が著しい地域を有する国

(g) ぜい弱な生態系（山岳の生態系を含む。）を有する地域を有する国

(h) 化石燃料及び関連するエネルギー集約的な製品の生産、加工及び輸出による収入又はこれらの消費に経済が大きく依存している国

(i) 内陸国及び通過国 更に、この8の規定に関しては、適当な場合には締約国会議が措置をとることができる。

締約国は、資金供与及び技術移転に関する措置をとるに当たり、後発開発途上国の個別のニーズ及び特別な事情について十分な考慮を払う。

締約国は、第十条の規定に従い、この条約に基づく約束の履行に当たり、気候変動に対応するための措置の実施による悪影響を受けやすい経済を有する締約国（特に開発途上締約国）の事情を考慮に入れる。この場合において、特に、化石燃料及び関連するエネルギー集約的な製品の生産、加工及び輸出による収入若しくはこれらの消費にその経済が大きく依存している締約国又は化石燃料の使用にその経済が大きく依存し、かつ、代替物への転換に重大な困難を有する締約国の事情を考慮に入れる。

第五条 研究及び組織的観測

締約国は、前条1(g)の規定に基づく約束の履行に当たって、次のことを行う。

- (a) 研究、資料の収集及び組織的観測について企画し、実施し、評価し及び資金供与を行うことを目的とする国際的な及び政府間の計画、協力網又は機関について、努力の重複を最小限にする必要性に考慮を払いつつ、これらを支援し及び、適当な場合には、更に発展させること。
- (b) 組織的観測並びに科学的及び技術的研究に関する各国（特に開発途上国）の能力を強化するための並びに各国が自国の管轄の外の区域において得られた資料及びその分析について利用し及び交換することを促進するための国際的な及び政府間の努力を支援すること。
- (c) 開発途上国の特別の懸念及びニーズに考慮を払うこと並びに(a)及び(b)に規定する努力に参加するための開発途上国の固有の能力を改善することについて協力すること。

第六条 教育、訓練及び啓発

締約国は、第四条 1 (i) の規定に基づく約束の履行に当たって、次のことを行う。

- (a) 国内的な（適当な場合には小地域的及び地域的な）規模で、自国の法令に従い、かつ、自国の能力の範囲内で、次のことを促進し及び円滑にすること。
 - (i) 気候変動及びその影響に関する教育啓発事業の計画の作成及び実施
 - (ii) 気候変動及びその影響に関する情報の公開
 - (iii) 気候変動及びその影響についての検討並びに適当な対応措置の策定への公衆の参加
 - (iv) 科学、技術及び管理の分野における人材の訓練
- (b) 国際的に及び造当な場合には既存の団体を活用して、次のことについて協力し及びこれを促進すること。
 - (i) 気候変動及びその影響に関する教育及び啓発の資料の作成及び交換
 - (ii) 教育訓練事業の計画（特に開発途上国のためのもの。国内の教育訓練機関の強化及び教育訓練専門家を養成する者の交流又は派遣に関するものを含む。）の作成及び実施

第七条 締約国会議

この条約により締約国会議を設置する。

締約国会議は、この条約の最高機関として、この条約及び締約国会議が採択する関連する法的文書の実施状況を定期的に兼用するものとし、その権限の範囲内で、この条約の効果的な実施を促進するために必要な決定を行う。このため、締約国会議は、次のことを行う。

- (a) この条約の目的、この条約の実施により得られた経験並びに科学上及び技術上の知識の進展に照らして、この条約に基づく締約国の義務及びこの条約の下における制度的な措置について定期的に検討すること。
- (b) 締約国の様々な事情、責任及び能力並びにこの条約に基づくそれぞれの締約国の約束を考慮して、気候変動及びその影響に対処するために締約国が採用する措置に関する情報の交換を促進し及び円滑にすること。
- (c) 二以上の締約国の要請に応じ、締約国の様々な事情、責任及び能力並びにこの条約に基づくそれぞれの締約国の約束を考慮して、気候変動及びその影響に対処するために締約国が採用する措置の調整を円滑にすること。
- (d) 締約国会議が合意することとなっている比較可能な方法、特に、温室効果ガスの発生源による排出及び吸収源による除去に関する目録を作成するため並びに温室効果ガスの排出の抑制及び除去の増大に関する措置の効果を評価するための方法について、この条約の目的及び規定に従い、これらの開発及び定期的な改善を促進し及び指導すること。
- (e) この条約により利用が可能となるすべての情報に基づき、締約国によるこの条約の実施状況、この条約に基づいてとられる措置の全般的な影響（特に、環境、経済及び社会に及ぼす影響並びにこれらの累積的な影響）及びこの条約の目的の達成に向けての進捗状況を評価すること。
- (f) この条約の実施状況に関する定期的な報告書を検討し及び採択すること並びに当該報告書の公表を確保すること。
- (g) この条約の実施に必要な事項に関する勧告を行うこと。
- (h) 第四条の3から5までの規定及び第十一条の規定に従って資金が供与されるよう努めること。
- (i) この条約の実施に必要と認められる補助機関を設置すること。
- (j) 補助機関により提出される報告書を検討し、及び補助機関を指導すること。
- (k) 締約国会議及び補助機関の手続規則及び財政規則をコンセンサス方式により合意し及び採択すること。
- (l) 適当な場合には、能力を有する国際機関並びに政府間及び民間の団体による役務、協力及び情報の提供を求め及び利用すること。
- (m) その他この条約の目的の達成のために必要な任務及びこの条約に基づいて締約国会議に課されるすべての任務を遂行すること。

締約国会議は、第一回会合において、締約国会議及びこの条約により設置される補助機関の
手続規則を採択する。この手続規則には、この条約において意思決定手続が定められていない事
項に関する意思決定手筋を含む。この手続規則には、特定の決定の採択に必要な特定の多数を
含むことができる。

締約国会議の第一回会合は、第二十一条に規定する暫定的な事務局が招集するものとし、この
条約の効力発生の日の後一年以内に開催する。その後は、締約国会議の通常会合は、締約国会
議が別段の決定を行わない限り、毎年開催する。

締約国会議の特別会合は、締約国会議が必要と認めるとき又はいずれかの締約国から書面によ
る要請のある場合において事務局がその要請を締約国に通報した後六箇月以内に締約国の少な
くとも三分の一がその要請を支持するときに開催する。

国際連合、その専門機関、国際原子力機関及びこれらの国際機関の加盟国又はオブザーバーで
あってこの条約の締約国でないものは、締約国会議の会合にオブザーバーとして出席すること
ができる。この条約の対象とされている事項について認められた団体又は機関（国内若しくは
国際の又は政府若しくは民間のものいずれであるかを問わない。）であって、締約国会議の会
合にオブザーバーとして出席することを希望する旨事務局に通報したものは、当該会合に出席
する締約国の三分の一以上が反対しない限り、オブザーバーとして出席することを認められる。
オブザーバーの出席については、締約国会議が採択する手続規則に従う。

第八条 事務局

この条約により事務局を設置する。

事務局は、次の任務を遂行する。

- (a) 締約国会議の会合及びこの条約により設置される補助機関の会合を準備すること並びに必
要に応じてこれらの会合に役務を提供すること。
- (b) 事務局に提出される報告書を取りまとめ及び送付すること。
- (c) 要請に応じ、締約国（特に開発途上締約国）がこの条約に従って情報を取りまとめ及び送付
するに当たり、当該締約国に対する支援を円滑にすること。
- (d) 事務局の活動に関する報告書を作成し、これを締約国会議に提出すること。

- (e) 他の関係国際団体の事務局との必要な調整を行うこと。
- (f) 締約国会議の全般的な指導の下に、事務局の任務の効果的な遂行のために必要な事務的な及び契約上の取決めを行うこと。
- (g) その他この条約及びその議定書に定める事務局の任務並びに締約国会議が決定する任務を遂行すること。

締約国会議は、第一回会合において、常設の事務局を指定し、及びその任務の遂行のための措置をとる。

第九条 科学上及び技術上の助言に関する補助機関

この条約により科学上及び技術上の助言に関する補助機関を設置する。当該補助機関は、締約国会議及び適当な場合には他の補助機関に対し、この条約に関連する科学的及び技術的な事項に関する時宜を得た情報及び助言を提供する。当該補助機関は、すべての締約国による参加のために開放するものとし、学際的な性格を有する。当該補助機関は、関連する専門分野に関する知識を十分に有している政府の代表者により構成する。当該補助機関は、その活動のすべての側面に関して、締約国会議に対し定期的に報告を行う。

1の補助機関は、締約国会議の指導の下に及び能力を有する既存の国際団体を利用して次のことを行う。

- (a) 気候変動及びその影響に関する科学上の知識の現状の評価を行うこと。
- (b) この条約の実施に当たってとられる措置の影響に関する科学的な評価のための準備を行うこと。
- (c) 革新的な、効率的な及び最新の技術及びノウハウを特定すること並びにこれらの技術の開発又は移転を促進する方法及び手段に関する助言を行うこと。
- (d) 気候変動に関する科学的な計画、気候変動に関する研究及び開発における国際協力並びに開発途上国の固有の能力の開発を支援する方法及び手段に関する助言を行うこと。
- (e) 締約国会議及びその補助機関からの科学、技術及び方法論に関する質問に回答すること。

1の補助機関の任務及び権限については、締約国会議が更に定めることができる。

第十条 実施に関する補助機関

この条約により実施に関する補助機関を設置する。当該補助機関は、この条約の効果的な実施について評価し及び検討することに関して締約国会議を補佐する。当該補助機関は、すべての締約国による参加のために開放するものとし、気候変動に関する事項の専門家である政府の代表者により構成する。当該補助機関は、その活動のすべての側面に関して、締約国会議に対し定期的に報告を行う。

1の補助機関は、締約国会議の指導の下に、次のことを行う。

- (a) 気候変動に関する最新の科学的な評価に照らして、締約国によってとられた措置の影響を全体として評価するため、第十二条1の規定に従って送付される情報を検討すること。
- (b) 締約国会議が第四条2(d)に規定する検討を行うことを補佐するため、第十二条2の規定に従って送付される情報を検討すること。
- (c) 適当な場合には、締約国会議の行う決定の準備及び実施について締約国会議を補佐すること。

第十一条 資金供与の制度

贈与又は緩和された条件による資金供与（技術移転のためのものを含む。）のための制度についてここに定める。この制度は、締約国会議の指導の下に機能し、締約国会議に対して責任を負う。締約国会議は、この条約に関連する政策、計画の優先度及び適格性の基準について決定する。当該制度の運営は、一又は二以上の既存の国際的組織に委託する。

1の資金供与の制度については、透明な管理の仕組みの下に、すべての締約国から衡平なかつ均衡のとれた形で代表されるものとする。

締約国会議及び1の資金供与の制度の運営を委託された組織は、1及び2の規定を実施するための取決めについて合意する。この取決めには、次のことを含む。

- (a) 資金供与の対象となる気候変動に対処するための事業が締約国会議の決定する政策、計画の優先度及び適格性の基準に適合していることを確保するための方法
- (b) 資金供与に関する個別の決定を(a)の政策、計画の優先度及び適格性の基準に照らして再検討するための方法
- (c) 1に規定する責任を果たすため、当該組織が締約国会議に対し資金供与の実施に関して定期的に報告書を提出すること。
- (d) この条約の実施のために必要かつ利用可能な資金の額について、予測し及び特定し得るよう

な方法により決定すること、並びにこの額の定期的な検討に関する要件

締約国会議は、第一回会合において、第二十一条3に定める暫定的措置を検討し及び考慮して、1から3までの規定を実施するための措置をとり、及び当該暫定的措置を維持するかしないかを決定する。締約国会議は、その後四年以内に、資金供与の制度について検討し及び適当な措置をとる。

先進締約国は、また、二国間の及び地域的その他の多数国間の経路を通じて、この条約の実施に関連する資金を供与することができるものとし、開発途上締約国は、これを利用することができる。

第十二条 実施に関する情報の送付

締約国は、第四条1の規定に従い、事務局を通じて締約国会議に対し次の情報を送付する。

(a) 温室効果ガス（モントリオール議定書によって規制されているものを除く。）の発生源による人為的な排出及び吸収源による除去に関する自国の目録。この目録は、締約国会議が合意し及び利用を促進する比較可能な方法を用いて、自国の能力の範囲内で作成する。

(b) この条約を実施するために締約国がとり又はとろうとしている措置の概要

(c) その他この条約の目的の達成に関連を有し及び通報に含めることが適当であると締約国が認める情報（可能なときは、世界全体の排出量の傾向の算定に関連する資料を含む。）

附属書1の締約国は、送付する情報に次の事項を含める。

(a) 第四条2の(a)及び(b)の規定に基づく約束を履行するために採用した政策及び措置の詳細

(b) (a)に規定する政策及び措置が、温室効果ガスの発生源による人為的な排出及び吸収源による除去に関して第四条2(a)に規定する期間についてもたらす効果の具体的な見積り

更に、附属書11の締約国は、第四条の3から5までの規定に従ってとる措置の詳細を含める。

開発途上締約国は、任意に、資金供与の対象となる事業を提案することができる。その提案には、当該事業を実施するために必要な特定の技術、資材、設備、技法及び慣行を含めるものとし、可能な場合には、すべての増加費用、温室効果ガスの排出の削減及び除去の増大並びにこれらに伴う利益について、それらの見積りを含める。

附属書 1 の締約国は、この条約が自国について効力を生じた後六箇月以内に最初の情報の送付を行う。附属書 1 の締約国以外の締約国は、この条約が自国について効力を生じた後又は第四条 3 の規定に従い資金が利用可能となった後三年以内に最初の情報の送付を行う。後発開発途上国である締約国は、最初の情報の送付については、その裁量によることができる。すべての締約国がその後行う送付の頻度は、この 5 に定める送付の期限の差異を考慮して、締約国会議が決定する。

事務局は、この条の規定に従って締約国が送付した情報をできる限り速やかに締約国会議及び関係する補助機関に伝達する。締約国会議は、必要な場合には、情報の送付に関する手続について更に検討することができる。

開発途上締約国が、この条の規定に従って情報を取りまとめ及び送付するに当たり並びに第四条の規定に基づいて提案する事業及び対応措置に必要な技術及び資金を特定するに当たり、締約国会議は、第一回会合の時から、開発途上締約国に対しその要請に応じ技術上及び財政上の支援が行われるよう措置をとる。このような支援は、適当な場合には、他の締約国、能力を有する国際機関及び事務局によって行われる。

この条の規定に基づく義務を履行するための情報の送付は、締約国会議が採択した指針に従うこと及び締約国会議に事前に通報することを条件として、二以上の締約国が共同して行うことができる。この場合において、送付する情報には、当該二以上の締約国のこの条約に基づくそれぞれの義務の履行に関する情報を含めるものとする。

事務局が受領した情報であって、締約国会議が定める基準に従い締約国が秘密のものとして指定したものは、情報の送付及び検討に関係する機関に提供されるまでの間、当該情報の秘密性を保護するため、事務局が一括して保管する。

9 の規定に従うことを条件として、かつ、締約国が自国の送付した情報の内容をいつでも公表することができることを妨げることなく、事務局は、この条の規定に従って送付される締約国の情報について、締約国会議に提出する時に、その内容を公に利用可能なものとする。

第十三条 実施に関する問題の解決

締約国会議は、第一回会合において、この条約の実施に関する問題の解決のための多数国間の協議手続（締約国がその要請により利用することができるもの）を定めることを検討する。

第十四条 紛争の解決

この条約の解釈又は適用に関して締約国間で紛争が生じた場合には、紛争当事国は、交渉又は当該紛争当事国が選択するその他の平和的手段により紛争の解決に努める。

地域的な経済統合のための機関でない締約国は、この条約の解釈又は適用に関する紛争について、同一の義務を受諾する締約国との関係において次の一方又は双方の手段を当然にかつ特別の合意なしに義務的であると認めることをこの条約の批准、受諾若しくは承認若しくはこれへの加入の際に又はその後いつでも、寄託者に対し書面により宣言することができる。

(a) 国際司法裁判所への紛争の付託

(b) 締約国会議ができる限り速やかに採択する仲裁に関する附属書に定める手続による仲裁

地域的な経済統合のための機関である締約国は、他に規定する手続による仲裁に関して同様の効果を有する宣言を行うことができる。

2の規定に基づいて行われる宣言は、当該宣言の期間が満了するまで又は書面による当該宣言の撤回の通告が寄託者に寄託された後三箇月が経過するまでの間、効力を有する。

新たな宣言、宣言の撤回の通告又は宣言の期間の満了は、紛争当事国が別段の合意をしない限り、国際司法裁判所又は仲裁裁判所において進行中の手続に何ら影響を及ぼすものではない。

2の規定が連用される場合を除くほか、いずれかの紛争当事国が他の紛争当事国に対して紛争が存在する旨の通告を行った後十二箇月以内にこれらの紛争当事国が1に定める手段によって当該紛争を解決することができなかつた場合には、当該紛争は、いずれかの紛争当事国の要請により調停に付される。

いずれかの紛争当事国の要請があつたときは、調停委員会が設置される。調停委員会は、各紛争当事国が指名する同数の委員及び指名された委員が共同で選任する委員長によって構成される。

調停委員会は、勧告的な裁定を行い、紛争当事国は、その裁定を誠実に検討する。

1 から 6 までに定めるもののほか、調停に関する手続は、締約国会議ができる限り速やかに採択する調停に関する附属書に定める。

この条の規定は、締約国会議が採択する関連する法的文書に別段の定めがある場合を除くほか、当該法的文書について準用する。

第十五条 この条約の改正

締約国は、この条約の改正を提案することができる。

この条約の改正は、締約国会議の通常会合において採択する。この条約の改正案は、その採択が提案される会合の少なくとも六箇月前に事務局が締約国に通報する。事務局は、また、改正案をこの条約の署名国及び参考のために寄託者に通報する。

締約国は、この条約の改正案につき、コンセンサス方式により合意に達するようあらゆる努力を払う。コンセンサスのためのあらゆる努力にもかかわらず合意に達しない場合には、改正案は、最後の解決手段として、当該会合に出席しかつ投票する締約国の四分の三以上の多数による議決で採択する。採択された改正は、事務局が寄託者に通報するものとし、寄託者がすべての締約国に対し受諾のために送付する。

改正の受諾書は、寄託者に寄託する。3 の規定に従って採択された改正は、この条約の締約国の少なくとも四分の三の受諾書を寄託者が受領した日の後九十日目の日に、当該改正を受諾した締約国について効力を生ずる。

改正は、他の締約国が当該改正の受諾書を寄託者に寄託した日の後九十日目の日に当該他の締約国について効力を生ずる。

この条の規定の適用上、「出席しかつ投票する締約国」とは、出席しかつ賛成票又は反対票を投ずる締約国をいう。

第十六条 この条約の附属書の採択及び改正

この条約の附属書は、この条約の不可分の一部を成すものとし、「この条約」というときは、別段の明示の定めがない限り、附属書を含めていうものとする。附属書は、表、書式その他科学的、技術的、手続的又は事務的な性格を有する説明的な文書に限定される（ただし、第十四条の2（b）及び7の規定については、この限りでない。 ）。

この条約の附属書は、前条の2から4までに定める手続を準用して提案され及び採択される。

2の規定に従って採択された附属書は、寄託者がその採択を締約国に通報した日の後六箇月で、その期間内に当該附属書を受諾しない旨を寄託者に対して書面により通告した締約国を除くほか、この条約のすべての締約国について効力を生ずる。当該附属書は、当該通告を撤回する旨の通告を寄託者が受領した日の後九十日目の日に、当該通告を撤回した締約国について効力を生ずる。

この条約の附属書の改正の提案、採択及び効力発生は、2及び3の規定によるこの条約の附属書の提案、採択及び効力発生と同一の手続に従う。

附属書の採択又は改正がこの条約の改正を伴うものである場合には、採択され又は改正された附属書は、この条約の改正が効力を生ずる時まで効力を生じない。

第十七条 議定書

締約国会議は、その通常会合において、この条約の議定書を採択することができる。

議定書案は、1の通常会合の少なくとも六箇月前に事務局が締約国に通報する。

議定書の効力発生の要件は、当該議定書に定める。

この条約の締約国のみが、議定書の締約国となることができる。

議定書に基づく決定は、当該議定書の締約国のみが行う

第十八条 投票権

この条約の各締約国は、2に規定する場合を除くほか、一の票を有する。

地域的な経済統合のための機関は、その権限の範囲内の事項について、この条約の締約国であるその構成国の数と同数の票を投ずる権利を行使する。当該機関は、その構成国が自国の投票権を行使する場合には、投票権を行使してはならない。その逆の場合も、同様とする。

第十九条 寄託

国際連合事務総長は、この条約及び第十七条の規定に従って採択される議定書の寄託者とする。

第二十条 署名

この条約は、国際連合環境開発会議の開催期間中はリオ・デ・ジャネイロにおいて、千九百九十二年六月二十日から千九百九十三年六月十九日まではニュー・ヨークにある国際連合本部において、国際連合又はその専門機関の加盟国、国際司法裁判所規程の当事国及び地域的な経済統合のための機関による署名のために開放しておく。

第二十一条 暫定的措置

第八条に規定する事務局の任務は、締約国会議の第一回会合が終了するまでの間、国際連合総会が千九百九十年十二月二十一日の決議第二百十二号（第四十五回会期）によって設置した事務局が暫定的に遂行する。

1に規定する暫定的な事務局の長は、気候変動に関する政府間パネルと緊密に協力し、同パネルによる客観的な科学上及び技術上の助言が必要とされる場合に、同パネルが対応することができることを確保する。科学に関するその他の関連団体も、協議を受ける。

国際連合開発計画、国際連合環境計画及び国際復興開発銀行の地球環境基金は、第十一条に規定する資金供与の制度の運営について暫定的に委託される国際的組織となる。この点に関し、同基金が同条の要件を満たすことができるようにするため、同基金は、適切に再編成されるべきであり、その参加国の構成は、普遍的なものとされるべきである。

第二十二条 批准、受諾、承認又は加入

この条約は、国家及び地域的な経済統合のための機関により批准され、受諾され、承認され又は加入されなければならない。この条約は、この条約の署名のための期間の終了の日の後は、加入のために開放しておく。批准書、受諾書、承認書又は加入書は、寄託者に寄託する。

この条約の締約国となる地域的な経済統合のための機関で当該機関のいずれの構成国も締約国となっていないものは、この条約に基づくすべての義務を負う。当該機関及びその一又は二以上の構成国がこの条約の締約国である場合には、当該機関及びその構成国は、この条約に基づく義務の履行につきそれぞれの責任を決定する。この場合において、当該機関及びその構成国は、この条約に基づく権利を同時に行使することができない。

地域的な経済統合のための機関は、この条約の規律する事項に関する当該機関の権限の範囲をこの条約の批准書、受諾書、承認書又は加入書において宣言する。当該機関は、また、その権限の範囲の実質的な変更を寄託者に通報し、寄託者は、これを締約国に通報する。

第二十三条 効力発生

この条約は、五十番目の批准書、受諾書、承認書又は加入書の寄託の日の後九十日目の日に効力を生ずる。

この条約は、五十番目の批准書、受諾書、承認書又は加入書の寄託の後にこれを批准し、受諾し若しくは承認し又はこれに加入する国又は地域的な経済統合のための機関については、当該国又は機関による批准書、受諾書、承認書又は加入書の寄託の日の後九十日目の日に効力を生ずる。

地域的な経済統合のための機関によって寄託される文書は、1及び2の規定の適用上、当該機関の構成国によって寄託されたものに追加して教えることはない。

第二十四条 留保

この条約には、いかなる留保も付することができない。

第二十五条 脱退

締約国は、自国についてこの条約が効力を生じた日から三年を経過した後いつでも、寄託者に対して書面による脱退の通告を行うことにより、この条約から脱退することができる。

1の脱退は、寄託者が脱退の通告を受領した日から一年を経過した日又はそれよりも遅い日であって脱退の通告において指定されている日に効力を生ずる。

この条約から脱退する締約国は、自国が締約国である議定書からも脱退したものとみなす。

第二十六条 正文

アラビア語、中国語、英語、フランス語、ロシア語及びスペイン語をひとしく正文とするこの条約の原本は、国際連合事務総長に寄託する。

以上の証拠として、下名は、正当に委任を受けてこの条約に署名した。

千九百九十二年五月九日にニュー・ヨークで作成した。

附属書1

オーストラリア、オーストリア、ベラルーシ（注）、ベルギー、ブルガリア（注）、カナダ、チェッコ・スロヴァキア（注）、デンマーク、欧州経済共同体、エストニア（注）、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、ハンガリー（注）、アイスランド、アイルランド、イタリア、日本国、ラトヴィア（注）、リトアニア（注）、ルクセンブルグ、オランダ、ニュー・ジーランド、ノールウェイ、ポーランド（注）、ポルトガル、ルーマニア（注）、ロシア連邦（注）、スペイン、スウェーデン、スイス、トルコ、ウクライナ（注）、グレート・ブリテン及び北部アイルランド連合王国、アメリカ合衆国

注 市場経済への移行の過程にある国

附属書2

オーストラリア、オーストリア、ベルギー、カナダ、デンマーク、欧州経済共同体、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、アイスランド、アイルランド、イタリア、日本国、ルクセンブルグ、オランダ、ニュー・ジーランド、ノールウェイ、ポルトガル、スペイン、スウェーデン、スイス、トルコ、グレート・ブリテン及び北部アイルランド連合王国、アメリカ合衆国

日本国政府は、平成四年五月九日にニュー・ヨークで作成された「気候変動に関する国際連合枠組条約」を平成五年五月二十八日に受諾していたところ、同条約は、その第二十三条1の規定に

従い、平成六年三月二十一日に効力を生じた。

なお、平成六年三月二十一日現在、同条約の締約国は次のとおりである。

アルジェリア民主人民共和国、アンティグア・バーブーダ、アルゼンティン共和国、アルメニア共和国、オーストラリア連邦、オーストリア共和国、ボツワナ共和国、ブラジル連邦共和国、ブルキナ・ファソ、カナダ、中華人民共和国、キューバ共和国、チェッコ共和国、デンマーク王国、ドミニカ国、エクアドル共和国、フィジー共和国、ドイツ連邦共和国、ギニア共和国、ハンガリー共和国、アイスランド共和国、インド、日本国、ジョルダン・ハシェミット王国、大韓民国、モルディヴ共和国、マルタ共和国、マーシャル諸島共和国、モーリタニア・イスラム共和国、モーリシャス共和国、メキシコ合衆国、ミクロネシア連邦、モナコ公国、モンゴル国、ナウル共和国、オランダ王国、ニュー・ジーランド、ノールウェー王国、パプア・ニューギニア独立国、パラグアイ共和国、ペルー共和国、ポルトガル共和国、セント・クリストファー・ネイヴィース、セント・ルシア、セイシェル共和国、スペイン、スリ・ランカ民主社会主義共和国、スーダン共和国、スウェーデン王国、スイス連邦、チュニジア共和国、トゥヴァル、ウガンダ共和国、グレート・ブリテン及び北部アイルランド連合王国、アメリカ合衆国、ウズベキスタン共和国、ヴァヌアツ共和国、ザンビア共和国、ジンバブエ共和国、欧州経済共同体

A2.2 気候変動に関する国際連合枠組条約京都議定書

この議定書の締約国は、
気候変動に関する国際連合枠組条約（以下「条約」という。）の締約国として、
条約第2条に規定する条約の究極的な目的を追求し、
条約の規定を想起し、
条約第3条の規定を指針とし、
条約の締約国会議の決定1/CP.1により採択されたベルリンマンデートに従い、
次のとおり協定した。

第1条

この議定書の適用上、条約第1条の定義を適用する。これに加え、

1. 「締約国会議」とは、条約の締約国会議をいう。
2. 「条約」とは、1992年5月9日にニューヨークで採択された気候変動に関する国際連合枠組条約をいう。
3. 「気候変動に関する政府間会合」とは、1988年に世界気象機関及び国際連合環境計画により共同で設置された気候変動に関する政府間会合をいう。
4. 「モントリオール議定書」とは、1987年9月16日に採択され、その後、調整され及び改正されたオゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書をいう。
5. 「出席しかつ投票する締約国」とは、出席しかつ賛成票又は反対票を投ずる締約国をいう。
6. 「締約国」とは、文脈により別に解釈される場合を除くほか、この議定書の締約国をいう。

7. 「附属書 I の締約国」とは、その後改正されたものも含め、条約の附属書 I に掲げる締約国又は条約第 4 条 2 (g) の規定に従って通報した締約国をいう。

第 2 条

1. 附属書 I の締約国は、第 3 条に規定する数量的な排出抑制及び削減の約束の履行に当たり、持続可能な開発を促進するために、次のことを行う。

(a) 各国の事情に応じて、政策及び措置（例えば、次に掲げるもの）を実施し又は策定しなければならない。

(i) 自国の経済の関連部門におけるエネルギー効率の向上

(ii) 関連する国際的な環境協定に基づく約束を考慮した温室効果ガス（モントリオール議定書によって規制されているものを除く。）の吸収源及び貯蔵庫の保護及び強化並びに持続可能な森林管理慣行、植林及び再植林の促進

(iii) 気候変動を考慮した持続可能な形態の農業の促進

(iv) 新エネルギー及び再生可能エネルギー、二酸化炭素固定技術並びに高度で革新的な環境上適正な技術の研究並びに促進、開発及び利用の増進

(v) 条約の目的に反するすべての温室効果ガス排出部門における市場の不完全性、財政的インセンティブ、免税及び補助金の段階的な縮小及び撤廃並びに市場的手法の適用

(vi) 温室効果ガス（モントリオール議定書によって規制されているものを除く。）の排出を抑制し又は削減する政策及び措置の促進を目的とする関連部門における適当な改革の奨励

(vii) 運輸部門における温室効果ガス（モントリオール議定書によって規制されているものを除く。）の排出を抑制し又は削減する措置

(viii) 廃棄物の管理並びにエネルギーの生産、輸送及び分配の際の回収及び再利用によるメタ

ンの排出の抑制又は削減

(b) 条約第4条2(e)(i)の規定に基づき、この条の規定により採用された政策及び措置の単独の効果及び複合的な効果を高めるために、他の附属書Iの締約国と協力すること。このため、これらの締約国は、そのような政策及び措置の経験を共有し及び情報を交換するための措置をとらなければならない。この措置には、比較可能性、透明性及び効果を改善する方法の開発を含む。この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、第1回会合において又はその後できる限り速やかに、すべての関連する情報に考慮を払いつつ、そのような協力を促進する方法を検討しなければならない。

2. 附属書Iの締約国は、国際民間航空機関及び国際海事機関を通じて作業を行い、それぞれ、航空機燃料及びバンカー油から排出される温室効果ガス（モントリオール議定書によって規制されているものを除く。）の抑制又は削減を検討しなければならない。

3. 附属書Iの締約国は、条約第3条の規定に考慮を払いつつ、気候変動の悪影響、国際貿易への影響並びに他の締約国（特に開発途上締約国及びとりわけ条約第4条8及び9の締約国）に対する社会上、環境上及び経済上の影響その他の悪影響を最小限にするような方法で、この条の規定に基づく政策及び措置を講じるよう努めなければならない。この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、この3の規定の実施を促進するために、適当な場合には、さらなる行動をとることができる。

4. この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、各国の異なる事情及び潜在的な影響を考慮に入れつつ、1(a)に規定する政策及び措置を調整することが有益であると決定した場合には、その政策及び措置の調整を更に詳細に詰めるための方法と手段を検討しなければならない。

第3条

1. 附属書Iの締約国は、2008年から2012年までの約束期間において、附属書Iの締約国全体の排出量を1990年の水準から少なくとも5パーセント削減することを念頭において、個別に又は共同で、附属書Aに掲げる温室効果ガスの人為的な排出量（二酸化炭素換算量）の合計が、附属書Bに定める数量的な排出抑制及び削減の約束に基づいて計算された割当量を超えないことを確保しなければならない。

2. 附属書 I の締約国は、2005 年までに、この議定書に基づく約束の達成に当たって、明らかな進捗を実現していなければならない。

3. 各約束期間において検証できるような炭素貯蔵量の変化として測定された、1990 年以降の植林、再植林及び森林の減少に限り、直接的かつ人為的な土地利用変化及び林業活動から生ずる温室効果ガスの発生源による排出及び吸収源による除去の純変化は、附属書 I の締約国のこの条の規定に基づく約束の履行のために用いられなければならない。これらの活動に関連する温室効果ガスの発生源による排出及び吸収源による除去は、透明かつ検証可能な方法で報告され、条約第 7 条及び第 8 条の規定に従って検討されなければならない。

4. 附属書 I の締約国は、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議の第 1 回会合の時までに、科学上及び技術上の助言に関する補助機関による検討のために、1990 年の炭素貯蔵量の水準を確定し、及びそれ以降の年の炭素貯蔵量の変化を推測できるようにするためのデータを提供しなければならない。この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、その第 1 回会合において又はその後できる限り速やかに、不確実性、報告の透明性、検証可能性、気候変動に関する政府間会合が行う方法論についての作業並びに第 5 条の規定及び締約国会議の決定に基づき科学的及び技術的助言に関する補助機関が行う助言に考慮を払いつつ、農業土壌、土地利用変化及び林業分野における温室効果ガスの発生源による排出及び吸収源による除去の変化に関連する追加的な人為的活動のうち、附属書 I の締約国の割当量に加え、又は割当量から差し引くべき活動の種類及び方法に関する仕組み、規則及び指針を決定しなければならない。この決定は、第 2 期の約束期間又はそれ以降の約束期間に適用されるものとする。締約国は、その活動が 1990 年以降に行われる場合には、これらの追加的な人為的活動に係る決定を、第 1 期の約束期間に適用することを選択することができる。

5. 市場経済への移行の過程にある附属書 I の締約国であって、締約国会議の第 2 回会合における決定 9/CP. 2 によって基準年又は基準期間が定められているものは、この条の規定に基づく約束の履行に当たって、当該基準年又は基準期間を用いなければならない。その他の市場経済への移行の過程にある附属書 I の締約国であって、条約第 12 条の規定により最初の情報を送付していない国は、この条の規定に基づく約束を履行するために、1990 年以外の過去の基準年又は基準期間を用いる旨を、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議に通告することができる。この議定

書の締約国の会合として機能する締約国会議は、この通告の受諾について決定しなければならない。

6. この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、条約第4条6の規定に考慮を払いつつ、市場経済への移行の過程にある附属書Iの締約国によるこの条の規定に基づく約束以外のこの議定書に基づく約束の履行については、ある程度の弾力的適用を認めることとする。

7. 2008年から2012年までの最初の数量的な排出抑制及び削減の約束期間における附属書Iの締約国の割当量は、1990年又は5の規定に従って決定される基準年又は基準期間における附属書Aに掲げる温室効果ガスの人為的な排出量（二酸化炭素換算量）の合計のうち、当該締約国につき附属書Bで定める割合に相当する量に、5を乗じて得た量に相当するものとする。附属書Iの締約国であって、1990年の土地利用変化及び林業が温室効果ガスの純発生源となるものは、その国の割当量を計算するために、1990年の排出の基準年又は基準期間に、1990年の土地利用変化からの人為的な発生源による排出量（二酸化炭素換算量）から吸収源による除去量を差し引いたものを含めなければならない。

8. 附属書Iの締約国は、7の規定による計算のために、ハイドロフルオロカーボン、パーフルオロカーボン及び六弗化硫黄に係る基準年を1995年とすることができる。

9. 附属書Iの締約国の次の期間における約束は、第21条7の規定に従って採択されるこの議定書の附属書Bの改正によって設定する。この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、1に規定する第1期の約束期間の終期の7年前までに、この約束に関する検討を始めなければならない。

10. 締約国が第6条又は第17条の規定に従って他の締約国から獲得した排出削減単位又は割当量の一部は、これを獲得した締約国の割当量に加えなければならない。

11. 締約国が第6条又は第17条の規定に従って他の締約国に移転した排出削減単位又は割当量の一部は、これを移転した締約国の割当量から差し引かななければならない。

12. 締約国が第12条の規定により他の締約国から獲得した認証排出削減量は、これを獲得した締約国の割当量に加えなければならない。

13. 附属書Iの締約国の約束期間における排出量が、この条の規定による割当量を下回る場合には、当該締約国の求めにより、その差に相当する量を次の約束期間の割当量に加えることができる。

14. 附属書Iの締約国は、開発途上締約国（特に条約第4条8及び9に規定する開発途上締約国）に及ぼす社会上、環境上及び経済上の悪影響を最小化するような方法で、1の規定に基づく約束を履行するよう努めなければならない。この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、第1回会合において、これらの規定の実施に関する締約国会議の関連する決定に従って、これらの規定で定める締約国に及ぼす気候変動の悪影響又は対応措置の影響を最小化するために、どのような行動が必要であるかについて検討しなければならない。この検討の対象には、基金の設置、保険及び技術移転が含まれる。

第4条

1. 前条の規定に基づく約束を共同で履行することについて合意に達した附属書Iの締約国は、附属書Aに掲げる温室効果ガスの人為的な排出量（二酸化炭素換算量）の合計を合算した量が、附属書Bに掲げる数量的な排出抑制及び削減の約束に基づき及び第3条の規定により計算した割当量を超えない場合には、その約束を達成したものとみなされる。この合意の当事国であるそれぞれの締約国に割り当てられる排出量の水準は、当該合意において示されなければならない。

2. この合意の当事国である締約国は、この議定書の批准書、承諾書、承認書又は加入書の寄託の日に、その合意の内容を事務局に通告しなければならない。事務局は、条約の締約国及び署名国に対し、この合意の内容を通報しなければならない。

3. この合意は、前条7に規定する約束期間の終了までの間は、効力を有する。

4. 締約国が、地域的な経済統合のための機関の枠組により、及び地域的な経済統合のための機関とともに実施する場合には、この議定書の採択後の当該機関の構成の変更は、この議定書に基づく既存の約束に影響を及ぼさない。当該機関の構成の変更は、その変更後に定める第3条の規定に基づく約束についてのみ適用する。

5. この合意の当事国である締約国が、合算した排出削減の水準を達成できなかった場合には、

当該合意の当事国である各締約国は、各締約国につき当該合意で定められた排出量の水準について、責任を有する。

6. 締約国が、この議定書の締約国である地域的な経済統合のための機関の枠組により、及び地域的な経済統合のための機関とともに実施する場合で、合算した排出削減の水準を達成できなかったときは、当該機関の構成国は、個別に及び第 24 条の規定に従って実施する地域的な経済統合のための機関と共同で、この条の規定に従って通告した排出量の水準について、責任を有する。

第 5 条

1. 附属書 I の締約国は、第 1 期の約束期間が始まる 1 年前までに、すべての温室効果ガス（モントリオール議定書によって規制されているものを除く。）の発生源による人為的な排出量及び吸収源による除去量を推計するための国内の制度を整備しなければならない。この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、第 1 回会合において、2 に規定する方法を含む国内の制度についての指針を決定する。

2. すべての温室効果ガス（モントリオール議定書によって規制されているものを除く。）の発生源による人為的な排出量及び吸収源による除去量を推計するための方法は、気候変動に関する政府間会合が承認し、及び条約の締約国会議が第 3 回会合において合意したものとする。この方法が用いられない場合には、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議が第 1 回会合において合意する方法に従って、適正な調整を加えなければならない。この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、特に気候変動に関する政府間会合の成果並びに科学上及び技術上の助言に関する補助機関が行う助言に基づき、条約の締約国会議が行う関連する決定に十分に考慮を払いつつ、当該方法及び調を定期的に検討し、適当な場合には改正するものとする。方法又は調整の改正は、その改正後に採択される第 3 条の規定に基づく約束の履行を確保するためにのみ用いるものとする。

3. 附属書 A に掲げるすべての温室効果ガスの発生源による人為的な排出量及び吸収源による除去量の二酸化炭素換算量を計算するために用いる地球温暖化係数は、気候変動に関する政府間会合が承認し、及び条約の締約国会議が第 3 回会合において合意したものとする。この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、特に気候変動に関する政府間会合の成果並びに科学上及び技術上の助言に関する補助機関が行う助言に基づき、条約の締約国会議が行う関連する決定に十分に考

慮を払いつつ、それぞれの温室効果ガスに係る地球温暖化係数を定期的に検討し、適当な場合には改正するものとする。地球温暖化係数の改正は、その改正後に採択される第3条の規定に基づく約束の履行を確保するためにのみ用いるものとする。

第6条

1. 第3条の規定に基づく約束を履行するため、附属書Iの締約国は、他の附属書Iの締約国から、あらゆる経済部門における温室効果ガスの発生源による人為的な排出の削減又は吸収源による人為的な吸収の強化を目的とする事業から生じる排出削減単位を、移転し又は獲得することができる。ただし、次の要件を満たすことを条件とする。

(a) かかる事業について、関係締約国の承認を得ていること。

(b) かかる事業が、当該事業が行われない場合に対して、追加的な、発生源による排出の削減又は吸収源による吸収の強化をもたらすこと。

(c) 第5条及び第7条の規定に基づく義務を遵守していない場合には、排出削減単位を獲得しないこと。

(d) 排出削減単位の獲得が、第3条の規定に基づく約束を履行するための国内の措置に対して補完的なものであること。

2. この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、第1回会合において又はその後できる限り速やかに、検証及び報告のためのものを含め、この条の規定を実施するために必要な指針を策定することができる。

3. 附属書Iの締約国は、その責任により、この条の規定に基づく排出削減量の発生、移転又は獲得につながる活動への法的主体の参加を認めることができる。

4. 第8条の関連する規定に従って、附属書Iの締約国によるこの条に規定する条件の実施についての疑義が提起された場合であっても、当該疑義が提起された後も、引き続き、排出削減単位の移転及び獲得を行うことができる。ただし、遵守の問題が解決するまでは、いかなる締約国も、第3

条の規定に基づく約束の履行のためにこの排出削減単位を用いてはならないことを条件とする。

第7条

1. 附属書 I の締約国は、条約の締約国会議の関連する決定に従って提出する、すべての温室効果ガス（モントリオール議定書によって規制されているものを除く。）の発生源による人為的な排出及び吸収源による除去に関する毎年の目録に、4 の規定により決定される第3条の遵守を確保するために必要な補足的な情報を含めなければならない。

2. 附属書 I の締約国は、条約第 12 条の規定に従って提出する自国の情報に、4 の規定により決定されるこの議定書に基づく約束の遵守を明らかにするために必要な補足的な情報を含めなければならない。

3. 附属書 I の締約国は、自国に対してこの議定書が効力を生じた後に求められる最初の目録とともに、及びそれ以降は毎年、1 の規定により求められる情報を提出しなければならない。附属書 I の締約国は、自国に対してこの議定書が効力を発生し、及び4 の規定で定める指針が採択された後に求められる最初の自国の情報の送付の一部として、2 の規定により求められる情報を提出しなければならない。この条の規定により求められる情報の提出のその後の頻度は、締約国会議が決定する各国の情報の提出に関する日程を考慮しつつ、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議が決定する。

4. この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、締約国会議が採択する附属書 I の締約国による各国の情報の準備のための指針に考慮を払いつつ、第1回会合において、この条の規定により求められる情報の準備のための指針を採択し、その後、定期的に見直さなければならない。この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、第1期の約束期間の前に、割当量の計算の方法を決定しなければならない。

第8条

1. 前条の規定に従って附属書 I の締約国が提出する情報は、関連する締約国会議の決定に基づき、及びこの議定書の締約国の会合として機能する締約国会議が4 の規定に従って採択する指針に従い、専門家による検討チームが検討する。附属書 I の締約国が前条1 の規定に従って提出した情報は、排出の目録及び割当量の毎年の編集及び計算の一部として検討する。また、附属書 I の締約

国が前条2の規定に従って提出した情報は、情報の送付の検討の一部として検討する。

2. 専門家による検討チームは、事務局が調整し及び締約国会議がこの目的のために条約の締約国会議が採択する指針に従い、条約の締約国及び適当な場合には政府間機関が指名する者の中から選ばれる者によって構成する。

3. この検討は、締約国によるこの議定書の実施のすべての側面について、完全かつ包括的に技術的な評価を行うものとする。専門家による検討チームは、締約国の約束の実施を評価し及び約束の履行における潜在的な問題及び約束の履行に影響を与える要因を評価して、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議に報告を提出する。事務局は、この報告をすべての条約の締約国に送付する。事務局は、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議が更に検討を行うために、この報告が示唆する実施に関する疑義を提示する。

4. この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、締約国会議の関連する決定に考慮を払いつつ、専門家による検討チームが行うこの議定書の実施に関する検討のための指針を、第1回会合において採択し、その後は定期的に検討する。

5. この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、実施に関する補助機関及び適切な場合には科学上及び技術上の助言に関する補助機関の支援を得て、次の事項を検討する。

(a) 第7条の規定に従って締約国が送付する情報及びこの条の規定に従って専門家による検討チームが作成する報告書

(b) 締約国が提起し、及び3の規定に従って事務局が提示する実施に関する疑義

6. この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、5の規定による情報の検討に基づき、この議定書の実施のために必要な事項について決定するものとする。

第9条

1. この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、気候変動及びその影響に関する利用可能な最善の科学上の情報及び評価並びに関連する技術上、社会上及び経済上の情報に照らして、

この議定書を定期的に検討する。この検討は、条約に基づく関連する検討、特に条約第4条2(d)及び第7条2(a)の規定により求められる検討と調整される。この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、この検討に基づき、適当な措置をとる。

2. 第1回目の検討は、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議の第2回会合において行う。その後の検討は、一定の間隔で、かつ適当な時期に行う。

第10条

締約国は、それぞれ共通に有しているが差異のある責任並びに各国及び地域に特有の開発の優先順位並びに各国特有の目的及び事情を考慮し、非附属書Iの締約国についていかなる新たな約束も導入しないが、条約第4条の規定に基づく既存の約束を再確認し、並びに持続可能な開発を達成するためにその約束の履行の促進を継続し、条約第4条3、5及び7の規定を考慮して、次のことを行う。

(a) すべての温室効果ガス（モントリオール議定書によって規制されているものを除く。）について、発生源による人為的な排出及び吸収源による除去に関する自国の目録を準備し及び定期的に更新するために、適当な場合に、かつ、可能な範囲において、締約国会議が定める比較可能な方法を用い、及び締約国会議が採択する自国の情報の送付の準備のための指針に従って、締約国の社会経済的状況を反映する、地域の排出係数、活動データ又はモデルの質を改善するための費用対効果の大きい自国の（適当な場合には地域の）計画を作成すること。

(b) 気候変動を緩和するための措置及び気候変動への適応を容易にするための措置を含む自国の（適当な場合には地域の）計画を作成し、実施し、公表し及び定期的に更新すること。

(i) これらの計画は、特に、エネルギー、運輸及び産業分野並びに農業、森林及び廃棄物の管理に関するものとする。さらに、土地利用計画の改善のための適応の技術及び方法は、気候変動に対する適応を改善するものとする。

(ii) 附属書Iの締約国は、第7条の規定に従い、自国の計画等この議定書に基づき講じる措置に関する情報を提出しなければならない。他の締約国は、適当な場合には、温室効果ガスの排出の増加の逡減及び吸収源による除去の強化並びに能力の向上及び適応措置等当該締約国が気候変動

及びその悪影響に対処することに寄与すると認める措置を含む計画に関する情報を、自国の情報の送付に含めるよう努めなければならない。

(c) 気候変動に関連する環境上適正な技術、知見、慣行及び工程を開発し、利用し及び普及するための効果的な方法の推進について協力するとともに、適当な場合には、特に途上国に対してこれらを移転し又は取得する機会の提供を促進し、容易にし、及び資金を供与するため、実施可能なすべての措置をとること。この措置には、環境上適正な技術を促進し、その移転及び取得の機会を強化するために、公的に所有され、又は公共部門に帰属する環境上適切な技術の効果的な移転のための政策及び計画を作成すること並びに民間部門の対応を可能にする環境を創設することが含まれる。

(d) 科学的及び技術的研究について協力し、気候変動とその悪影響及び種々の対応戦略による社会上及び経済上の結果に関連する不確実性を軽減するための、組織的観測の維持及び開発を促進し、並びに資料の保管所を設立し、並びに条約第5条の規定を勘案して、研究及び組織的観測に関する国際的及び政府間の努力、計画及び協力網に参加する各国の能力の開発及び強化を推進すること。

(e) 国際的なレベルで、適当な場合には既存の団体を活用しつつ、国家の能力、特に人材及び組織の能力の向上の強化、及び特に開発途上国のためのこの分野での専門家を養成するための人的交流又は派遣等教育訓練事業の計画の作成及び実施について協力し、及びその促進を図るとともに、自国において、気候変動に関する国民の意識を啓発し及び気候変動に関する情報の公開を促進すること。条約第6条の規定に考慮を払いつつ、条約の関連機関を通じて、これらの活動を実施するために、適切な方法が開発されなければならない。

(f) 締約国会議の関連する決定に従って、この条の規定に従って講じる計画及び活動に関する情報を、自国の国別報告書に含めること。

(g) この条の規定に基づく約束の実施に当たり、条約第4条8の規定に、できる限り考慮を払うこと。

第11条

1. 締約国は、前条の規定の実施に当たり、条約第4条4、5、7、8及び9の規定に考慮を払わなければならない。

2. 条約の附属書 II に掲げる先進締約国は、条約第4条の規定の実施に関し、条約第4条3及び第11条の規定に従って、並びに条約の資金供与の制度の運営を委託された組織を通じて、次のことを行う。

(a) 開発途上締約国が第10条(a)の規定の対象とされている条約第4条1(a)の規定に基づく既存の約束の履行を促進するために負担するすべての合意された費用に充てるため、新規のかつ追加的な資金を供与すること。

(b) また、前条の規定の対象とされている条約第4条1の規定に基づく既存の約束の履行を促進するための措置であって、開発途上締約国と条約第11条に規定する国際的組織との間で合意するものを実施するためのすべての合意された増加費用を負担するために開発途上締約国が必要とする新規のかつ追加的な資金(技術移転のためのものを含む。)を同条の規定に従って供与すること。

これらの既存の約束の履行に当たっては、資金の流れの妥当性及び予測可能性が必要であること、並びに先進締約国間の適当な責任分担が重要であることについて考慮を払う。締約国会議の関連する決定で定める条約の資金供与の制度の運営を委託された組織に対する指導(この議定書の採択の前に合意されたものを含む。)は、この2の規定に準用する。

3. 条約の附属書 II に掲げる先進締約国は、また、二国間の及び地域的その他の多数国間の経路を通じて、第10条の実施のための資金を供与することができるものとし、開発途上締約国は、これを利用することができる。

第12条

1. クリーン開発メカニズムについて、ここに定める。

2. クリーン開発メカニズムの目的は、非附属書 I の締約国が持続可能な開発を達成し、及び条約の究極の目的に貢献することを支援し、並びに附属書 I の締約国が第3条の規定に基づく数量的な排出抑制及び削減の約束の遵守を達成することを支援することとする。

3. クリーン開発メカニズムの下で、

(a) 非附属書 I の締約国は、認証された排出削減量をもたらす事業活動から利益を得る。

(b) 附属書 I の締約国は、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議の決定に従い、第 3 条の規定に基づく数量的な排出抑制及び削減の約束の一部の履行に寄与するため、事業活動から生ずる認証排出削減量を利用することができる。

4. クリーン開発メカニズムは、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議の権威と指導に従い、及びクリーン開発メカニズムの執行委員会によって監督される。

5. 各事業活動から生ずる排出削減量は、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議が指定する運営組織が、次の原則に基づいて認証する。

(a) 関係締約国によって承認された自主的な参加

(b) 気候変動の緩和に関連する実質的で、測定可能な、長期的な利益

(c) 認証された事業活動がない場合に生じる削減に対し、追加的な排出削減

6. クリーン開発メカニズムは、必要に応じ、認証事業活動の資金の準備を支援する。

7. この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、第 1 回会合において、事業活動に対する独立した監査及び検証を通じて透明性、効率性及び責任を確保するために、方法及び手続を策定しなければならない。

8. この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、認証事業活動の利益の一部が、運営費用を賄うとともに、気候変動の悪影響に対して、特に脆弱な開発途上締約国が適応の費用を支払うことへの支援に用いられることを確保しなければならない。

9. 3 (a)の規定による活動及び認証排出削減量の獲得を含むクリーン開発メカニズムへの参加は、民間又は公的主体を含むことができ、クリーン開発メカニズムの執行委員会が与えるすべての指導に従わなければならない。

10. 2000年から第1期の約束期間が始まるまでの期間に得られた認証排出削減量は、第1期の約束期間における遵守の達成を支援するために用いることができる。

第13条

1. 条約の最高機関である締約国会議は、この議定書の締約国の会合として機能する。

2. この議定書の締約国でない条約の締約国は、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議のいずれの会合の議事にもオブザーバーとして参加できる。締約国会議がこの議定書の締約国の会合として機能するときは、この議定書に基づく決定は、この議定書の締約国のみによってなされなければならない。

3. 締約国会議がこの議定書の締約国の会合として機能する場合は、締約国会議のビューローの構成員であって、その時点においてこの議定書の締約国でない条約の締約国を代表するものは、この議定書の締約国により、及びこの議定書の締約国の中から選ばれる追加的な構成員によって代えられなければならない。

4. この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、この議定書の実施状況を定期的に検討するものとし、その権限の範囲内で、この議定書の効果的な実施を促進するために必要な決定を行う。このため、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、付与された任務を遂行するとともに、次のことを行う。

(a) この議定書により得られるすべての情報に基づき、この議定書の締約国による実施の状況、この議定書により採用された対策の全体としての効果、特に環境上、経済上及び社会上の効果並びに対策の累積的な影響並びに条約の目的の達成に向けた進展の程度を評価すること。

(b) 条約の目的、その実施により得られた経験並びに科学的及び技術的知見の進展に照らして、条約第4条2(d)及び第7条2の規定により求められる検討を考慮しつつ、この議定書に基づく締

約国の義務を定期的に点検するとともに、この観点からこの議定書の実施に関する定期的報告を検討し及び採択すること。

(c) 締約国の様々な事情、責任及び能力並びにこの議定書に基づくそれぞれの締約国の約束に考慮を払いつつ、気候変動及びその影響に対処するために締約国が採用する措置に関する情報の交換を推進し及び助長すること。

(d) 二以上の締約国の要請に応じ、締約国の様々な事情、責任及び能力並びにこの議定書に基づくそれぞれの締約国の約束に考慮を払いつつ、気候変動及びその影響に対処するためにそれらの締約国が採用する措置の調整を促進すること。

(e) 条約の目的とこの議定書の規定に従い、締約国会議による関連する決定に十分に考慮を払いつつ、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議が合意するこの議定書の効果的な実施のための比較可能な方法の開発と定期的な改良を推進し及び指導すること。

(f) この議定書の実施のために必要な事項に関して勧告すること。

(g) 第 11 条 2 の規定に従い、追加的な資金供給がなされるよう努めること。

(h) この議定書の実施のために必要と考えられる補助的な機関を設けること。

(i) 適当な場合には、適切な国際機関並びに政府間及び非政府の組織により提供されるサービス、協力及び情報を求め及び利用すること。

(j) この議定書の実施のために求められる任務を果たし、及び締約国会議の決定により生じる課題を検討すること。

5. 締約国会議の手続規則及び条約に基づいて適用される財政手続は、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議がコンセンサスにより決定する場合を除くほか、この議定書について準用する。

6. 事務局は、この議定書の効力発生の日の後に予定される最初の締約国会議の会合と併せて、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議の第1回会合を招集する。この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議のその後の通常の会合は、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議が別段の決定を行わない限り、毎年、締約国会議の通常の会合と併せて開催する。

7. この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議の特別の会合は、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議が必要と認めるとき又はいずれかの締約国から書面による要請があり、事務局がその要請を締約国に通報した後6箇月以内に締約国の少なくとも三分の一がその要請を支持するときに開催する。

8. 国際連合、その専門機関、国際原子力機関及びこれらの国際機関の加盟国又はオブザーバーであってこの条約の締約国でないものは、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議の会合にオブザーバーとして出席することができる。国内若しくは国際の又は政府若しくは民間のものいずれであるかを問わず、この議定書の対象とされている事項について認定された団体又は機関であって、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議にオブザーバーとして出席することを希望する旨事務局に通知したものは、当該会合に出席している締約国の三分の一以上が反対しない限り、オブザーバーとして出席することを認められる。オブザーバーの取扱い及び参加については、5の規定による手続規則に従わなければならない。

第14条

1. 条約第8条の規定に基づき設置された事務局は、この議定書の事務局として機能する。

2. 事務局の任務に関する条約第8条2の規定及び事務局の任務の遂行のための措置に関する条約第8条3項の規定は、この議定書に準用する。事務局は、また、この議定書で定める任務を遂行する。

第15条

1. 条約第9条及び第10条の規定に従って設置された科学上及び技術上の助言に関する補助機関及び実施に関する補助機関は、それぞれ、この議定書の科学上及び技術上の助言に関する補助機関及び実施に関する補助機関として機能する。条約に基づくこれらの機関の機能に関する規定は、この議定書に準用する。この議定書の科学上及び技術上の助言に関する補助機関及び実施に関する補

助機関の会合は、それぞれ、条約の科学上及び技術上の助言に関する補助機関及び実施に関する補助機関と併せて開催する。

2. 議定書の締約国でない条約の締約国は、補助機関のどの会合の議事についてもオブザーバーとして参加することができる。補助機関が、この議定書の補助機関として機能する場合、この議定書に基づく決定は、この議定書の締約国のみによってなされなければならない。

3. 補助機関が、この議定書に関係した事項についての機能を行う場合は、その補助機関のビューローの構成員であって、その時点においてこの議定書の締約国でない条約の締約国を代表するものは、この議定書の締約国により、及びこの議定書の中から選ばれる追加的な構成員によって代えられなければならない。

第16条

この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議は、できる限り速やかに、条約の締約国会議が採択する関連する決定に照らし、条約第13条で規定する多数国間の協議手続のこの議定書への適用及び適切な改正を検討しなければならない。この議定書に適用される多数国間の協議手続は、第18条の規定に従って設けられる手続と仕組みに影響を及ぼさないように実施されなければならない。

第17条

締約国会議は、排出量取引に関連する原則、方法、規則及び指針（特に検証、報告及び責任に関するもの）を定める。附属書Bに掲げる締約国は、第3条の規定に基づく約束を履行するために、排出量取引に参加することができる。いかなるこうした取引も、当該規定に基づく数量的な排出抑制及び削減に関する約束を履行するための国内的な行動に対して補完的なものでなければならない。

第18条

この議定書の締約国の会合として開催する締約国会議は、第1回会合において、不履行の原因、種類、程度及び頻度を考慮しつつ、結果の示唆的なリストの作成によることを含め、この議定書の規定に係る不履行の事例を決定し及び取り扱うための適当かつ効果的な手続及び仕組みを承認しなければならない。この条の規定に基づく拘束力のある結論を伴う手続及び仕組みは、この議定書の改正によって採択しなければならない。

第19条

紛争の解決に関する条約第14条の規定は、必要な変更を加えて、この議定書に適用する。

第20条

1. 締約国は、この議定書の改正を提案することができる。
2. この議定書の改正は、この議定書の締約国の会合として開催する締約国会議の通常の会合において採択する。この議定書の改正案は、その採択が提案される会合の少なくとも6箇月前に、事務局が締約国に通報する。事務局は、また、改正案を条約の締約国及び署名国並びに参考のために寄託者に通報する。
3. 締約国は、議定書の改正案につき、コンセンサス方式により合意に達するようあらゆる努力を払う。コンセンサスのためのあらゆる努力にも拘わらず合意に達しない場合には、議定書の改正案は、最後の手段として、当該会合に出席しかつ投票する締約国の四分之三の多数決によって採択する。採択された改正は、事務局が寄託者に通報するものとし、寄託者はすべての締約国に対してその受諾のために送付する。
4. 改正の受諾書は、寄託者に寄託する。3の規定に従って採択された改正は、この議定書の締約国の少なくとも四分之三の受諾書を寄託者が受領した日の後90日目の日に、当該改正を受諾した締約国について効力を生ずる。
5. 改正は、他の締約国が当該改正の受託書を寄託者に寄託した日の後90日目の日に当該国について効力を生ずる。

第21条

1. この議定書の附属書は、この議定書の不可欠の一部を成すものとし、「この議定書」というときは、別段の明示の定めがない限り、附属書を含めていうものとする。この議定書の発効後に採択された附属書は、表、書式その他科学的、技術的、手続的又は事務的な性格を有する説明的な文書に限定される。

2. 締約国は、この議定書の附属書を提案し、及びこの議定書の附属書の改正を提案できる。

3. この議定書の附属書及び附属書の改正は、この議定書の締約国の会合として機能する締約国会議の通常の会合において採択される。附属書案及び附属書改正案文は、その採択が提案される会合の少なくとも6箇月前に、事務局が締約国に通報する。事務局は、附属書案又は附属書の改正案を条約の締約国及び署名国並びに参考のために寄託者に通報する。

4. 締約国は、附属書案及び附属書の改正案につき、コンセンサス方式により合意に達するようあらゆる努力を払う。コンセンサスのためのあらゆる努力にも拘わらず合意に達しない場合には、附属書又は附属書の改正は、最後の手段として、当該会合に出席しかつ投票する締約国の四分之三の多数決によって採択される。採択された附属書又は附属書の改正は、事務局が寄託者に通報するものとし、寄託者がすべての締約国に対し受諾のために送付する。

5. 3及び4の規定に従って採択された附属書又は附属書A若しくは附属書B以外の附属書の改正は、寄託者がその附属書の採択又は附属書の改正の採択を締約国に通報した日の6箇月後で、その期間内に当該附属書又は附属書の改正を受諾しない旨を書面により通告した締約国を除くほか、この議定書のすべての締約国について効力を生ずる。当該附属書又は附属書の改正は、当該通告を撤回する旨の通告を寄託者が受領した日の後90日目の日に当該通告を撤回した締約国について効力を生ずる。

6. 附属書の採択又は附属書の改正がこの議定書の改正を伴うものである場合には、採択された附属書又は改正された附属書は、この議定書の改正が効力を生ずる時まで効力を生じない。

7. この議定書の附属書A及び附属書Bの改正は、いかなる附属書Bの改正も、関係する締約国の書面による同意があってはじめて採択されるという条件で、前条に規定する手続に従い採択され及び効力を生ずる。

第22条

1. 各締約国は、2に規定する場合を除くほか、一の投票権を有する。

2. 地域的な経済統合のための機関は、その権限の範囲内の事項について、この議定書の締約国で

あるその構成国の数と同じ数の票を投ずる権利を行使する。当該機関は、その構成国が自国の投票権を行使する場合には、投票権を行使してはならない。その逆の場合も、同様とする。

第 23 条

国連事務総長は、この議定書の寄託者とする。

第 24 条

1. この議定書は、署名のために開放され、並びに条約の締約国である国家及び地域的な経済統合のための機関により、批准され、受託され又は承認されなければならない。この議定書は、1998年3月16日から1999年3月15日までニューヨークの国際連合本部において署名のために開放しておく。この議定書は、署名のための期間の終了の日の後は、加入のために開放しておく。批准書、受託書、承認書又は加入書は、寄託者に寄託する。

2. この議定書の締約国となる地域的な経済統合のための機関で当該機関のいずれの構成国も締約国となっていないものは、この議定書に基づくすべての義務を負う。当該機関の一又は二以上の構成国がこの議定書の締約国である場合には、当該機関及びその構成国は、この議定書に基づく義務の履行につきそれぞれの責任を決定する。この場合において、当該機関及びその構成国は、この議定書に基づく権利を同時に行使することができない。

3. 地域的な経済統合のための機関は、この議定書の規律する事項に関する当該機関の権限の範囲をこの議定書の批准書、受託書、承認書又は加入書において宣言する。当該機関は、また、その権限の範囲の実質的な変更を寄託者に通報し、寄託者は、これを締約国に通報する。

第 25 条

1. この議定書は、附属書 I の締約国の 1990 年における二酸化炭素排出総量の少なくとも 55 パーセントを占める附属書 I の締約国を含む 55 箇国以上の条約の締約国が批准書、受託書、承認書又は加入書を寄託した日の後 90 日目の日に効力を生ずる。

2. この条の規定の適用上、「附属書 I の締約国の 1990 年における二酸化炭素排出総量」とは、この議定書の採択の日又はそれ以前に、条約第 12 条の規定に従って提出した最初の自国の情報の送付において、附属書 I の締約国が通報した量とする。

3. この議定書は、1に規定する効力発生の要件が満たされた後に、これを批准し、受託し若しくは承認し又は加入する国又は地域的な経済統合のための機関については、批准書、受託書、承認書又は加入書の寄託の後90日目の日に効力を生ずる。

4. 地域的な経済統合のための機関によって寄託される文書は、この条の規定の適用上、当該機関の構成国によって寄託されたものに追加して数えてはならない。

第26条

この議定書には、いかなる留保も付することができない。

第27条

1. 締約国は、この議定書が効力を生じた日から3年を経過した後いつでも、寄託者に対して書面による脱退の通告を行うことにより、この議定書から脱退することができる。

2. 1の脱退は、寄託者が脱退の通知を受領した日から1年を経過した日又はそれよりも遅い日であって脱退の通告において指定されている日に効力を生ずる。

3. この条約から脱退する締約国は、この議定書からも脱退したものとみなす。

第28条

アラビア語、中国語、英語、フランス語、ロシア語及びスペイン語をひとしく正本とするこの議定書の原本は、国際連合事務総長に寄託する。

1997年12月11日に京都で作成した。

以上の証拠として、下名は、正当に委任を受けて記載の日にこの議定書に署名した。

附属書A

附属書B

温室効果ガス	締約国	数量的な排出抑制又は削減の約束 (基準年又は基準期間の割合)
二酸化炭素 (CO ₂)		
メタン (CH ₄)	オーストラリア	108
亜酸化窒素 (N ₂ O)	オーストリア	92
ハイドロフルオロカーボン (HFCs)	ベルギー	92
パーフルオロカーボン (PFCs)	ブルガリア*	92
六弗化硫黄 (SF ₆)	カナダ	94
部門/発生源分野	クロアチア*	95
エネルギー	チェコ共和国*	92
燃料の燃焼	デンマーク	92
エネルギー産業	エストニア*	92
製造業及び建設	欧州共同体	92
運輸	フィンランド	92
その他の部門	フランス	92
その他	ドイツ	92
燃料の漏出	ギリシャ	92
固形燃料	ハンガリー*	94
石油及び天然ガス	アイスランド	110
その他	アイルランド	92
工業プロセス	イタリア	92
鋳業製品	日本国	94
化学産業	ラトヴィア*	92
金属生産	リヒテンシュタイン	92
その他の生産	リトアニア*	92
ハロカーボン及び六弗化硫黄の生産	ルクセンブルグ	92
ハロカーボン及び六弗化硫黄の消費	モナコ	92
その他	オランダ	92
溶剤及びその他の製品の使用	ニュー・ジーランド	100
農業	ノールウェー	101
家畜の腸内発酵	ポーランド*	94
家畜の糞尿管理	ポルトガル	92
稲作	ルーマニア*	92
農業土壌	ロシア連邦*	100
サバンナの野焼き	スロバキア*	92
農業廃棄物の野焼き	スロベニア*	92
その他	スペイン	92
廃棄物	スウェーデン	92
固形廃棄物の埋立	スイス	92
下水処理	ウクライナ*	100
廃棄物の焼却	グレート・ブリテン及び北部 アイルランド連合王国	92
その他	アメリカ合衆国	93

* 市場経済への移行の過程にある国

付録3 アジアの統計

データを入手することができた国について、代表的な統計値を表 A3.1.1 に示す。

Table A3.1.1 Statistics on Asian countries. (As of 2003)

	GDP [GUSD]*1	Population [M]*2	Primary energy consumption [Mtoe]*3	CO2 emission [Mt-C]*4
Brunei Darussalam	5	0.3	3	2
Indonesia	168	215	118	91
Japan	4,876	128	517	336
Korea	586	48	205	124
Malaysia	99	25	54	41
Philippines	85	82	32	19
P. R. China	1,375	1,288	1,190	1,127
Singapore	93	4	22	14
Taipei, Chinese	314	23	98	69.6
Thailand	141	62	74	58
Vietnam	38	81	21	17
Whole Asia	9,246	3,467	2,783	2,280

*1 billion US dollar

*2 million people

*3 million ton oil equivalent

*4 million ton as C

付録4 単位

バイオマス関連の文献は幅広い分野にわたるため、通常見慣れない単位が出てきてとまどうことも多い。基本的にはS I 単位系を用いることが推奨されているため、ここでは、まずS I 単位系について説明し、その後、別の単位との換算について説明する。単位の詳細については小泉¹⁾、海老原²⁾の著書が有効である。

A4.1 S I 単位系

1960年の国際度量衡会議でS I 単位系を用いることが奨励されており、日本でも原則としてS I 単位系を用いることとなっている。S I 単位系は、7つの基本単位と2つの角度に関する補助単位、ならびにこれらを組み合わせてできる組み立て単位から構成される。また、10の整数乗倍を表す接頭語を用いて幅広い量を表す。以下に一覧表を示す。

表1. 1-1 S I 単位系の基本単位

量	基本単位
長さ	m (メートル)
質量	kg (キログラム)
時間	s (秒)
電流	A (アンペア)
熱力学温度	K (ケルビン)
物質質量	mol (モル)
光度	cd (カンデラ)

表 1. 1-2 S I 単位系
の補助単位

量	補助単位
平面角	rad (ラジ)
立体角	sr (ステラ)

立体角とは、懐中電灯など

表 1. 1-3 S I 単位系の代表的な組み立て単位

量	単位	基本単位の組み合わせによる表記
力	N (ニュートン)	m kg s^{-2}
圧力	Pa (パスカル)	$\text{N m}^{-2} = \text{m}^{-1} \text{kg s}^{-2}$
エネルギー・仕事	J (ジュール)	$\text{N m} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$
仕事率	W (ワット)	$\text{J s}^{-1} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$

表1. 1-4 S I 単位系の接頭語

接頭語	倍数	接頭語	倍数
da (デカ)	10^1	d (デシ)	10^{-1}
h (ヘクト)	10^2	c (センチ)	10^{-2}
k (キロ)	10^3	m (ミリ)	10^{-3}
M (メガ)	10^6	μ (マイクロ)	10^{-6}
G (ギガ)	10^9	n (ナノ)	10^{-9}
T (テラ)	10^{12}	p (ピコ)	10^{-12}
P (ペタ)	10^{15}	f (フェムト)	10^{-15}
E (エクサ)	10^{18}	a (アット)	10^{-18}
Z (ゼタ)	10^{21}	z (zepto)	10^{-21}
Y (ヨタ)	10^{24}	y (yobto)	10^{-24}

- 1) 接頭語は可能であれば数字が 0.1~1000 の間に入るようにつけるのが良い。例えば 0.05 nmよりは 50 pm とする。
- 2) 質量の基本単位は kg だが、接頭語は g につける。例えば、29 μ kg ではなく、29 mg とする。
- 3) 組立単位を作るときは接頭語は一つだけ用いる。例えば、20 mg/mm²ではなく 20 kg/m²とする。但し、kg については例外とする。例えば、21 MJ/kg として 21 kJ/g とはしない。

A4.2 単位換算

S I 単位系を利用することが奨励されているが、エネルギーの分野では今日でも慣習によってバレルや石油換算 t などの単位が用いられることもある。また、古い文献を参照する時に、単位換算が必要となることも多い。

ある単位で表された量を別の単位で表すときには換算式を用いる。例えば、 $^{\circ}\text{C}$ で表された温度 T_c を K で表された温度 T_K に変換する時には、次の換算式

$$T_K = T_c + 273.15$$

を用いる。換算式が比例式である場合には比例定数を換算係数と呼ぶ。例えば、in (インチ) で表された長さ L_{in} を m (メートル) で表された長さ L_m に変換する換算式は

$$L_m = 2.54 \times 10^{-2} L_{in}$$

であり、換算係数は $2.54 \times 10^{-2} \text{m/in}$ である。

いくつかの単位を組み合わせて作られる単位を組み立て単位というが、組み立て単位の単位換算はもとの単位の部分にそれぞれ換算係数を代入すればよい。例えば、 1500 ft/h を m/s で表すには、 $1 \text{ ft} = 3.048 \times 10^{-1} \text{m}$ 、 $1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$ より、

$$\begin{aligned} 1500 \text{ ft/h} &= 1500 (3.048 \times 10^{-1} \text{m}) / (3600 \text{ s}) \\ &= (1500) (3.048 \times 10^{-1}) / (3600) \text{ m/s} \\ &= 0.127 \text{ m/s} \end{aligned}$$

ある単位系で表された式を別の単位系の式に変換するときには、元の式に換算式を代入するのが間違いない。例えば、水の蒸気圧を表す式

$$\ln p_{\text{torr}} = 18.30363 - 3816.44 / (227.02 + T_C)$$

を S I 単位系で表すには、換算式

$$p_{\text{Torr}} = 7.50062e-3 \text{ pPa}$$

$$TC = TK - 273.15$$

を代入して、

$$\ln (7.50062e-3 \text{ pPa}) = 18.30363 - 3816.44 / (227.02 + (TK - 273.15))$$

$$\ln (7.50062e-3) + \ln \text{ pPa} = 18.30363 - 3816.44 / (227.02 - 273.15 + TK)$$

$$\ln \text{ pPa} = 18.30363 - \ln (7.50062e-3) - 3816.44 / (227.02 - 273.15 + TK)$$

計算して、

$$\ln \text{ pPa} = 23.1964 - 3816.44 / (-46.13 + TK)$$

となる。

以下に単位換算係数の表を示す。この表では、横方向に同じ量を示す。また、指数が小さくなると読み間違いやすくなるので、 3.937×10^1 などと表示する代わりに、 $3.9370E+01$ などと表示している。例えば、表 2-1 の 1 行目では、

$$1 \text{ m} = 3.2808 \text{ ft} = 39.37 \text{ in}$$

である。

表 1. 2-1 長さに関する単位換算係数

M	ft	In
1	3.2808E+00	3.9370E+01
3.0480E-01	1	1.2000E+01
2.5400E-02	8.3333E-02	1

表 1. 2-2 面積に関する単位換算係数

m ²	Km ²	a	ha	エーカー	畝(mu)	反	坪
1	1.0000E-06	1.0000E-02	1.0000E-04	2.4711E-04	1.5000E-03	1.0083E-03	3.0248E-01
1.0000E+06	1	1.0000E+04	1.0000E+02	2.4711E+02	1.5000E+03	1.0083E+03	3.0248E+05
1.0000E+02	1.0000E-04	1	1.0000E-02	2.4711E-02	1.5000E-01	1.0083E-01	3.0248E+01
1.0000E+04	1.0000E-02	1.0000E+02	1	2.4711E+00	1.5000E+01	1.0083E+01	3.0248E+03
4.0468E+03	4.0468E-03	4.0468E+01	4.0468E-01	1	6.0702E+00	4.0805E+00	1.2241E+03
6.6667E+02	6.6667E-04	6.6667E+00	6.6667E-02	1.6474E-01	1	6.7222E-01	2.0165E+02
9.9174E+02	9.9174E-04	9.9174E+00	9.9174E-02	2.4507E-01	1.4876E+00	1	2.9998E+02
3.3060E+00	3.3060E-06	3.3060E-02	3.3060E-04	8.1694E-04	4.9590E-03	3.3335E-03	1

日本の尺貫法での面積で、1町は10反、1反は10畝(せ)。上には反の換算を示す。当然ながら、この反と長さの単位の反とは別。坪は田畑、山林の場合には歩(ぶ)と称する。

表中の畝(mu)は中国の面積の単位。中国の統計、文献などでよく使われる。

表 1. 2-3 質量に関する単位換算係数

Kg	t	short ton (tn)	long ton (l. tn)	lb (ポンド)	oz (オンス)	貫
1	1.0000E-03	1.1023E-03	9.8421E-04	2.2046E+00	3.5274E+01	2.6667E-01
1.0000E+03	1	1.1023E+00	9.8421E-01	2.2046E+03	3.5274E+04	2.6667E+02
9.0719E+02	9.0719E-01	1	8.9286E-01	2.0000E+03	3.2000E+04	2.4192E+02
1.0160E+03	1.0160E+00	1.1200E+00	1	2.2400E+03	3.5840E+04	2.7095E+02
4.5359E-01	4.5359E-04	5.0000E-04	4.4643E-04	1	1.6000E+01	1.2096E-01
2.8349E-02	2.8349E-05	3.1250E-05	2.7902E-05	6.2500E-02	1	7.5600E-03
3.7500E+00	3.7500E-03	4.1336E-03	3.6907E-03	8.2672E+00	1.3228E+02	1

short ton は米国で用いられる単位、long ton は英国で用いられる単位。

表 1. 2-4 容量に関する単位換算係数

m ³	L	ft ³	US gallon	UK gallon	bb1	石
1	1.0000E+03	3.5315E+01	2.6417E+02	2.1997E+02	6.2898E+00	5.5440E+03
1.0000E-03	1	3.5315E-02	2.6417E-01	2.1997E-01	6.2898E-03	5.5440E+00
2.8317E-02	2.8317E+01	1	7.4805E+00	6.2288E+00	1.7811E-01	1.5699E+02
3.7854E-03	3.7854E+00	1.3368E-01	1	8.3267E-01	2.3810E-02	2.0986E+01
4.5461E-03	4.5461E+00	1.6054E-01	1.2010E+00	1	2.8594E-02	2.5204E+01
1.5899E-01	1.5899E+02	5.6146E+00	4.2000E+01	3.4972E+01	1	8.8143E+02
1.8038E-04	1.8038E-01	6.3699E-03	4.7650E-02	3.9677E-02	1.1345E-03	1

1 石は 1 0 0 升

この表にはないが、立方インチに関する換算係数は長さの表から求められる。

L の表示については、1、・などが用いられるが、1 との混同をさけるために L が推奨される。

推奨できないが、日本の慣用で、m³ を「りゅーべ」と読むことがある。

容量の単位に N をつけて気体の物質量を表すことがある。これは、標準状態 (0°C、1.013×10⁵ Pa) におけるその体積の気体に含まれる物質量のことで、例えば 22.4 Nm³ の気体は 1 kmol に相当する。

表 1. 2-5 エネルギーに関する単位換算係数 (1)

J	kWh	kcalIT	KcalJP	原油換算kL	石油換算t
1	2.7778E-07	2.3885E-04	2.3889E-04	2.5826E-11	2.3885E-11
3.6000E+06	1	8.5984E+02	8.6000E+02	9.2973E-05	8.5984E-05
4.1868E+03	1.1630E-03	1	1.0002E+00	1.0813E-07	1.0000E-07
4.1860E+03	1.1628E-03	9.9982E-01	1	1.0811E-07	9.9982E-08
3.8721E+10	1.0756E+04	9.2483E+06	9.2500E+06	1	9.2483E-01
4.1868E+10	1.1630E+04	1.0000E+07	1.0002E+07	1.0813E+00	1

石油換算 t(トン)は、TOE (ton oil equivalent)と省略される。

プロセス効率の計算などで、電力量消費を熱量消費と比較する時などに、電力が熱量からある発電効率で得られることを考慮して、もととなる熱量に換算して比較することがある。この操作を電力の1次エネルギー換算と呼ぶ。この時の換算係数は発電効率によるが、例えば総合エネルギー統計平成12年度版では、昭和46年(1971年)以降、発電効率を38.1%として、1 kWh = 9.42 MJを用いている。

表 1. 2-6 エネルギーに関する単位換算係数 (2)

J	Btu	kgf m	ft lbf	HP h
1	9.4782E-04	1.0197E-01	7.3750E-01	3.7417E-07
1.0551E+03	1	1.0759E+02	7.7810E+02	3.9477E-04
9.8066E+00	9.2948E-03	1	7.2324E+00	3.6693E-06
1.3559E+00	1.2852E-03	1.3827E-01	1	5.0734E-07
2.6726E+06	2.5331E+03	2.7253E+05	1.9710E+06	1

BtuはBritish thermal unit (英国熱量単位)の略。

表 1. 2-7 圧力に関する単位換算係数

Pa	psi	kgf/cm ²	atm	bar	Torr
1	1.4499E-04	1.0194E-05	9.8697E-06	1.0000E-05	7.5010E-03
6.8971E+03	1	7.0307E-02	6.8073E-02	6.8971E-02	5.1735E+01
9.8100E+04	1.4223E+01	1	9.6822E-01	9.8100E-01	7.3585E+02
1.0132E+05	1.4690E+01	1.0328E+00	1	1.0132E+00	7.6000E+02
1.0000E+05	1.4499E+01	1.0194E+00	9.8697E-01	1	7.5010E+02
1.3332E+02	1.9329E-02	1.3590E-03	1.3158E-03	1.3332E-03	1

圧力を表すには、大気圧を基準として表すゲージ圧、と真空を基準として表す絶対圧があり、それぞれ G, A を単位の後につけて表す。絶対圧はゲージ圧より大気圧分、即ち 1 atm だけ値が大きい。例えば、5 atmG = 6 atmA である。

Torr は mmHg と等しい。小文字で始まる torr と書くが、人名（トリチェリ）に由来する単位なので大文字で始めるのが適切。

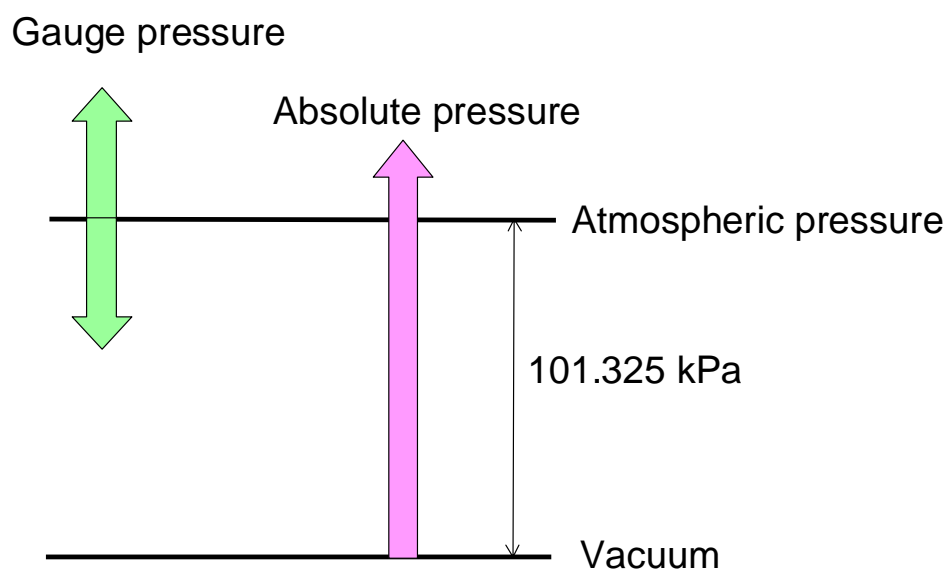


Fig. 4.2.1 Absolute pressure and gauge pressure

表 1. 2-8 仕事率に関する単位換算係数

W	メートル馬 力	HP	kgf m/s	ft lb/sec	Kcal/sec
1	1.3590E+00	1.3410E+00	1.0204E+02	7.3700E+02	2.3800E-01
7.3584E-01	1	9.8675E-01	7.5085E+01	5.4231E+02	1.7513E-01
7.4571E-01	1.0134E+00	1	7.6092E+01	5.4959E+02	1.7748E-01
9.8001E-03	1.3318E-02	1.3142E-02	1	7.2227E+00	2.3324E-03
1.3569E-03	1.8440E-03	1.8195E-03	1.3845E-01	1	3.2293E-04
4.2017E+00	5.7101E+00	5.6345E+00	4.2874E+02	3.0966E+03	1

A4.3 糖・アルコール濃度

糖とアルコールの濃度については、慣用によって様々な表記がなされることがある。糖から発酵によってエタノールを得る技術はバイオエネルギー利用上重要であるが、文献によって様々な単位の表記がなされるので、注意する必要がある。

A4.3.1 アルコール濃度

以下のような表記がなされる。

モル濃度：S I 単位。溶液 1 L 中に含まれるアルコール(エタノール)のモル数。単位は mol(-EtOH)/L(-溶液)

重量モル濃度：S I 単位。溶媒 1 kg 中に含まれるアルコールのモル数。単位は mol(-EtOH)/kg(-溶媒)

容量百分率：混合前のアルコール容積と混合前の水の容積の和に対する、混合前のアルコール容積の割合を百分率で表したもの。アルコールと水は混合すると容積が減少するので、混合前を基準とする。

(アメリカン・) プルーフ：米国で用いられる。容量百分率を 2 倍した値。

(ブリティッシュ・) プルーフ：水がアンダー・プルーフ 100 度、純粋なアルコールがオーバー・プルーフ 75.1 度となるような表し方で、容量百分率 w の度数は、 $(w/57.1) \times 100 - 100$ となる。即ち、57.1%のアルコールの度数が 0 となる。

A4.3.2 糖濃度

モル濃度と重量モル濃度はアルコール濃度の場合と同様に定義される。但し、糖として何を考えているかを明確にしておく必要がある。グルコースのみのモル数か、エタノール発酵の対象となる糖全体についてのモル数か、単糖のみか 2 量体、3 量体を単糖のモル数に換算しているか、など注意が必要である。

蔗糖度：蔗糖水溶液中の蔗糖の濃度を質量百分率であらわしたもの。

ブリックス(度)：蔗糖度と同じ。但し、一般的な比重の単位として用いられるブリックスとは異なるので注意が必要。

A4.4 温度

温度には、絶対温度とそうでない温度があり、これらは比例関係にないので換算式を用いて換算を行う必要がある。摂氏温度 $^{\circ}\text{C}$ に対応する絶対温度が K (ケルビン)、華氏温度 $^{\circ}\text{F}$ に対応する絶対温度が R (ランキン)である。次の表に、これらの間の換算式を示す。

表 1. 4-1 温度に関する単位換算式

単位換算	換算式
$^{\circ}\text{C}\rightarrow\text{K}$	$\text{TK} = \text{TC} + 273.15$
$^{\circ}\text{C}\rightarrow^{\circ}\text{F}$	$\text{TF} = 1.8 \text{TC} + 32$
$^{\circ}\text{C}\rightarrow\text{R}$	$\text{TR} = 1.8 \text{TC} + 491.67$
$\text{K}\rightarrow^{\circ}\text{C}$	$\text{TC} = \text{TK} - 273.15$
$\text{K}\rightarrow^{\circ}\text{F}$	$\text{TF} = 1.8 \text{TK} - 459.67$
$\text{K}\rightarrow\text{R}$	$\text{TR} = 1.8 \text{TK}$
$^{\circ}\text{F}\rightarrow^{\circ}\text{C}$	$\text{TC} = (5/9) (\text{TF} - 32)$
$^{\circ}\text{F}\rightarrow\text{K}$	$\text{TK} = (5/9) (\text{TF} + 459.67)$
$^{\circ}\text{F}\rightarrow\text{R}$	$\text{TR} = \text{TF} + 459.67$
$\text{R}\rightarrow^{\circ}\text{C}$	$\text{TC} = (5/9) \text{TR} - 273.15$
$\text{R}\rightarrow\text{K}$	$\text{TK} = (5/9) \text{TR}$
$\text{R}\rightarrow^{\circ}\text{F}$	$\text{TF} = \text{TR} - 459.67$

A4.5 発熱量 (第1部第4章も参照のこと)

発熱量は、有機物を完全燃焼した時に発生する熱量であるが、生成する水が水蒸気の状態か、液体の水の状態かによって、水の潜熱分だけ値が異なってくる。生成する水が水蒸気の状態である方が、蒸発潜熱分だけ値が小さくなるのでこれを低位発熱量(LHV, Lower heating value)と呼び、これに対して、生成する水が液体の水である時の発熱量を高位発熱量と呼ぶ。一般的には高位発熱量(HHV, Higher heating value)を用いて表すことが多いが、どちらの値であるかは注意しておく必要があり、またプロセスの状態に応じて使い分ける必要がある。なお、これらに対応する燃焼反応の質量基準のエンタルピー変化の符号を変えたものと等しい。高位発熱量と低位発熱量の換算式は、対象有機物の水素の重量分率を w_H とした時に、

$$HHV \text{ [MJ/kg]} = LHV \text{ [MJ/kg]} + 20.3 w_H$$

となる。

また、水分を含むバイオマスの発熱量を議論するときには、1. 乾いた重量あたりの発熱量か、水を含んだ重量あたりの発熱量か、2. 発熱量から水を蒸発させるのに必要な熱量を引いた値か、水の蒸発潜熱分は無視した値か、に注意する必要がある。1. については、次項「重量基準」を参照されたい。2. については、直接燃焼することを議論するような場合には水の蒸発に使われる熱量は、実際には利用できないので、この無駄になる熱量を差し引いた値を使うことが多いのに対し、メタン発酵などのプロセスについて議論する場合には含まれる水の蒸発に必要な熱量は考えないことが多い。重量基準の含水率が $ww[-]$ の時に、水の蒸発に必要な熱量を引いた値 HV_{net} [kJ/wet-kg] と、これを差し引かない値 HV_{int} [kJ/wet-kg] の関係は、

$$HV_{net} = HV_{int} - ww DH_{ww}$$

となる。ここで、 DH_{ww} は重量基準の水の蒸発潜熱で、25°Cの値を用いれば 2443 kJ/kg-H₂O である。

A4.6 重量基準

バイオマスの単位重量当たりについての特性値を示す場合には、単位重量が水分を含んだ値か、水分を除いた値か、また、灰を含んだ値か、灰を除いた値かを明確にしておく必要がある。よく乾燥した木材のように水分も灰分も数%程度であれば、これらの値のずれは小さいが、下水汚泥のように水分含有量も灰分含有量も大きい場合には計算が誤る可能性がある。乾重量基準の値を x_{db} 、湿重量基準の値を x_{wb} 、重量基準の含水率を ww とすれば、

$$x_{db} = p / m_{db} = p / \{m_{wb} (1-ww)\} = p / m_{wb} / (1-ww) = x_{wb} / (1-ww)$$

である。ここで p は対象とする物理量、 m_{wb} 、 m_{ww} はそれぞれ水を含まない乾き重量、水を含んだ湿重量である。同様に、無灰基準の値を x_{af} 、灰含有量基準の値を x_{wa} 、重量基準の灰含有量を $wash$ とすれば、

$$x_{af} = p / m_{af} = p / \{m_{wa} (1-wash)\} = p / m_{wa} / (1-wash) = x_{wa} / (1-wash)$$

である。例えば、あるガス化プロセスで含水率 20%のバイオマスをガス化した時、湿重量基準のガス発生量が $0.75 \text{ m}^3/\text{wet-kg}$ であれば、乾重量基準のガス発生量は、

$$0.75 / (1-0.2) = 0.9375 \text{ m}^3/\text{dry-kg}$$

となる。

A4.7 その他

米国などの工業関連では、MMという記号が用いられることがある。これはMがローマ数字の1000であることから、 1000×1000 で100万を意味する。例えば、500 MMG とあれば、 500×100 万ガロン = 5 億ガロン。

また、見慣れない単位で、単位の最後に M がつく物は「毎分…」である可能性がある。例えば、200 rpm は毎分 200 回転(revolutions per minute)、4 GPM は毎分 4 ガロン(Gallon per minute)、35 ccm は毎分 35 cc (cubic centimeters per minute)である。

付録5 原子量

A5.1 原子量

バイオマスに関する計算をするときに、原子量が必要となることが多い。Table A5.1.1 に原子量のリストを示す。よく用いるのは、C, H, O, N, S の原子量である。

Table A5.1.1 Atomic weight

Atomic number	Symbol of element	Element	Atomic weight [g/mol]
1	H	Hydrogen	1.0079
2	He	Helium	4.0026
3	Li	Lithium	6.941
4	Be	Beryllium	9.0122
5	B	Boron	10.811
6	C	Carbon	12.0107
7	N	Nitrogen	14.0067
8	O	Oxygen	15.9994
9	F	Fluorine	18.9984
10	Ne	Neon	20.1797
11	Na	Sodium	22.9897
12	Mg	Magnesium	24.305
13	Al	Aluminum	26.9815
14	Si	Silicon	28.0855
15	P	Phosphorus	30.9738
16	S	Sulfur	32.065
17	Cl	Chlorine	35.453

Table A5.1.1 Atomic weight (Continued)

Atomic number	Symbol of element	Element	Atomic weight [g/mol]
18	Ar	Argon	39.948
19	K	Potassium	39.0983
20	Ca	Calcium	40.078
21	Sc	Scandium	44.9559
22	Ti	Titanium	47.867
23	V	Vanadium	50.9415
24	Cr	Chromium	51.9961
25	Mn	Manganese	54.938
26	Fe	Iron	55.845
27	Co	Cobalt	58.9332
28	Ni	Nickel	58.6934
29	Cu	Copper	63.546
30	Zn	Zinc	65.39
31	Ga	Gallium	69.723
32	Ge	Germanium	72.64
33	As	Arsenic	74.9216
34	Se	Selenium	78.96
35	Br	Bromine	79.904
36	Kr	Krypton	83.8
37	Rb	Rubidium	85.4678
38	Sr	Strontium	87.62
39	Y	Yttrium	88.9059
40	Zr	Zirconium	91.224
41	Nb	Niobium	92.9064
42	Mo	Molybdenum	95.94
43	Tc	Technetium	98

Table A5.1.1 Atomic weight (Continued)

Atomic number	Symbol of element	Element	Atomic weight [g/mol]
44	Ru	Ruthenium	101.07
45	Rh	Rhodium	102.9055
46	Pd	Palladium	106.42
47	Ag	Silver	107.8682
48	Cd	Cadmium	112.411
49	In	Indium	114.818
50	Sn	Tin	118.71
51	Sb	Antimony	121.76
52	Te	Tellurium	127.6
53	I	Iodine	126.9045
54	Xe	Xenon	131.293
55	Cs	Cesium	132.9055
56	Ba	Barium	137.327
57	La	Lanthanum	138.9055
58	Ce	Cerium	140.116
59	Pr	Praseodymium	140.9077
60	Nd	Neodymium	144.24
61	Pm	Promethium	145
62	Sm	Samarium	150.36
63	Eu	Europium	151.964
64	Gd	Gadolinium	157.25
65	Tb	Terbium	158.9253
66	Dy	Dysprosium	162.5
67	Ho	Holmium	164.9303
68	Er	Erbium	167.259
69	Tm	Thulium	168.9342

Table A5.1.1 Atomic weight (Continued)

Atomic number	Symbol of element	Element	Atomic weight [g/mol]
70	Yb	Ytterbium	173.04
71	Lu	Lutetium	174.967
72	Hf	Hafnium	178.49
73	Ta	Tantalum	180.9479
74	W	Tungsten	183.84
75	Re	Rhenium	186.207
76	Os	Osmium	190.23
77	Ir	Iridium	192.217
78	Pt	Platinum	195.078
79	Au	Gold	196.9665
80	Hg	Mercury	200.59
81	Tl	Thallium	204.3833
82	Pb	Lead	207.2
83	Bi	Bismuth	208.9804
84	Po	Polonium	209
85	At	Astatine	210
86	Rn	Radon	222
87	Fr	Francium	223
88	Ra	Radium	226
89	Ac	Actinium	227
90	Th	Thorium	232.0381
91	Pa	Protactinium	231.0359
92	U	Uranium	238.0289
93	Np	Neptunium	237
94	Pu	Plutonium	244
95	Am	Americium	243

Table A5.1.1 Atomic weight (Continued)

Atomic number	Symbol of element	Element	Atomic weight [g/mol]
96	Cm	Curium	247
97	Bk	Berkelium	247
98	Cf	Californium	251
99	Es	Einsteinium	252
100	Fm	Fermium	257
101	Md	Mendelevium	258
102	No	Nobelium	259
103	Lr	Lawrencium	262

付録 6 熱力学的特性

A6.1 基本的な化学物質の熱力学関数

化学反応や相変化に伴う熱の出入りや、化学反応がどこまで進みうるかは、熱力学を用いて求めることができる。この計算に用いるデータの一部を示す。詳細は、化学便覧³⁾、Riedらの著書⁴⁾、蒸気表⁵⁾、化学工学便覧⁶⁾などを参照のこと。また、熱力学的計算の手法については、アトキンスの著書⁷⁾、小宮山の著書⁸⁾、山口の著書⁹⁾など、物理化学あるいは熱力学の教科書を参照のこと。また、バイオマスを含む一般的な物質の熱力学定数のデータを整理した書籍¹⁰⁾がある。

A6.2 標準生成エンタルピー、標準エントロピー、標準生成ギブス自由エネルギー

表3-1 にバイオマスに関連の代表的な物質に関する標準生成エンタルピー、標準エントロピー、標準生成ギブス自由エネルギーを示す。状態の欄の g, l, s の記号は、それぞれ、気体、液体、固体を示す。

表3-1 代表的な物質に関する標準生成エンタルピー、標準エントロピー、標準生成ギブス自由エネルギー

物質名	化学式	状態	標準生成エンタルピー [kJ mol ⁻¹]	標準エントロピー [J mol ⁻¹]	標準生成ギブス自由エネルギー [kJ mol ⁻¹]
一酸化炭素	CO	G	-110.53	197.67	-137.17
エタノール	C ₂ H ₅ OH	L	-277.1	159.86	
エタン	C ₂ H ₆	G	-83.8	229.60	
エチレン (エテン)	C ₂ H ₄	G	52.5	219.56	
ギ酸	HC ₂ HO ₂	L	-425.1	131.84	
グルコース	C ₆ H ₁₂ O ₆	S	-1273.3	N/A	N/A
酢酸	CH ₃ CO ₂ H	L	-484.3	158.0	
酸素	O ₂	G	0	205.14	0
水素	H ₂	G	0	130.68	0
炭素 (グラファイト)	C	S	0	5.74	0
二酸化炭素	CO ₂	G	-393.51	213.74	-394.36
プロパン	C ₃ H ₈	G	-104.7	270.02	
水	H ₂ O	L	-285.83	69.91	-237.13
水	H ₂ O	G	-241.82	188.83	-228.57
メタノール	CH ₃ OH	L	-239.1	127.19	
メタン	CH ₄	G	-74.4	186.38	

化学便覧による。

A6.3 水、メタノール、エタノールの転移エンタルピー変化

表3-2に、水、メタノール、エタノールの相転移に伴うエンタルピー変化を示す。

表3-2 水、メタノール、エタノールの転移エンタルピー変化

	相の転移	1.013×10 ⁵ Pa における転 移温度 [°C]	転移エンタルピー [kJ/mol]
水	s → l	273.15	6.01
水	l → g	373.15	40.66
メタノール	l → g	337.9	35.27
エタノール	l → g	351.7	38.6

化学便覧による。

A6.4 燃焼エンタルピー

化学物質が完全燃焼するときのエンタルピー変化を表3-3に示す。液体の水が生成する場合の値であり、この値の符号を変えたものが、その物質のモル基準高位発熱量に相当する。表3-1のデータを用いて計算も可能。

表3-3 代表的な化学物質の燃焼エンタルピー

物質名	状態	燃焼エンタルピー [kJ mol ⁻¹]	物質名	状態	燃焼エンタルピー [kJ mol ⁻¹]
一酸化炭素	g	-282.98	酢酸	l	-874.3
エタノール	l	-1367.6	水素	g	-285.83
エタン	g	-1560.7	炭素(グラファイト)	s	-393.51
エチレン(エテン)	g	-1411.2	プロパン	g	-2219.2
ギ酸	l	-254.24	メタノール	l	-725.7
グルコース	s	-2803.3	メタン	g	-890.7

化学便覧による。一部は著者による計算値。

付録 7 化石燃料の発熱量と可採年数

A7.1 化石燃料の発熱量と可採年数

化石燃料の発熱量と可採年数を表 A7.1.1 に示す。

表 A7.1.1 化石燃料の発熱量と可採年数

	石油	石炭	天然ガス
発熱量(代表値)* [MJ/kg]	40	28	56
可採年数 [年]	46	219	64

* あくまでも代表値であり、産地や処理条件によって大きく異なるので注意が必要である。また、ここに示しているのは高位発熱量である。

付録 8 APEC の枠組み

A8.1 APEC とは

APEC（アジア太平洋経済協力, Asia-Pacific Economic Cooperation）とは、アジア太平洋地域の持続可能な発展を目的とし、域内の全主要国・地域が参加するフォーラム。1989年11月の第1回閣僚会合（オーストラリア・キャンベラ）をもって発足し、1993年以降首脳会議を開催している。域内の貿易投資の自由化・円滑化、経済・技術協力を主要な活動とする。

Table A8.1.1 APEC Countries

Australia

Brunei Darussalam*

Cambodia

Canada

Chili

Hongkong, Chinese

Indonesia*

Japan

Korea

Laos

Malaysia*

Mexico

New Zealand

Papua New Guinea

Peru

Philippines*

P. R. China

Russia

Singapore*

Taipei, Chinese

Thailand*

United States of America

Vietnam*

* ASEAN Countries

付録 9 各国の目標

A9.1 各国のバイオマス導入目標

各国のバイオマスの導入目標を Table A9.1.1 に示す。

Table A9.1.1 Target of each country

Country	Target
Cambodia	There are no targets.
Indonesia	Development of biofuel plantation in 5.25 M ha unused land. According to Road Map Biofuel Development the Biofuel utilization (biodiesel, bioethanol, bio-oil) will be 2% of national energy mix of 5.29 M kL by 2010.
Japan	Thermal use of biomass: 3.08 M kL, Electricity production from biomass and wastes: 5.86 M kL oil equivalent at 2010
Korea	Thermal use of biomass: 0.679 million kL, Electricity production from biomass and wastes: 0.367 million kL oil equivalent at 2011
Laos	Now the government drafting the policy and target for the biofuel especially biodiesel from the Jatropha to mix with the fossil diesel to be B5 by the year 2012, B5 by the year 2015 and B15 by 2020. And For the Ethanol is E10 by the year 2015 and E20 by the year 2020. These target is under drafting of the document.
Malaysia	The target for electricity generation from renewable energy (including biomass) is set at 350MWe in Peninsular Malaysia and 50MWe in Sabah

Table A9.1.1 Target of each country (Continued)

Country	Target
Philippines	Two years from the effectivity of the Act, at least 5% bioethanol by volume of the total volume of gasoline fuel sold and distributed by each and every oil company in the country. Within four years from the effectivity of the Act, the Philippine Department of Energy, may mandate a mimimum of 10% blend depending on the results of the study by the national Board created under the Act. Three months after the approval of the Act,a minimum of 1% biodiesel by volume shall be blended into all diesel engine fuels sold in the country. Within two years from the effectivity of the Act, the Philippine Department of Energy, may mandate a total of 2% blend depending on the results of the study by the national Board created under the Act. Provided that the ethanol and biodiesel blends conform to Philippine National Standard.
P. R. China	Percentages of renewable energy consumption will be 10% by 2010 and 15% by 2020. By 2010, annual consumption of non-grain based fuel ethanol shall reach 2 M tons, and that of biodiesel shall reach 200 000 tons in China. By 2020, annual consumption of fuel ethanol shall reach 10 M tons, and that of biodiesel shall reach 2 M tons in China.
Taipei, Chinese	<ol style="list-style-type: none"> 1.Elecricity installed capacity of 741MW from biomass and wastes in 2010 2.Biodiesel production : 100 thousand KL in 2010 3.Bioethanol production: 100 thousand KL in 2011

付録 10 バイオマス関連の歴史

A10.1 アジアのバイオマス関連の歴史

表 A10.1.1 にアジアのバイオマスに関連する最近の年表を示す。

Table A10.1 Time table on Asian biomass

2005.1	1 st Biomass Asia Workshop (Tokyo and Tsukuba)
2005.12	2 nd Biomass Asia Workshop (Bangkok)
2006.1	Biomass Asia Forum (Tokyo)
2006.11	3 rd Biomass Asia Workshop (Tokyo and Tsukuba)
2007.3	Startup of Asia Biomass Association
2007.4	Laos joins Asia Biomass Association
2007.11	4 th Biomass Asia Workshop (Shar Alam)

付録 11 各国語の辞典

A11.1 各国の言語と代表的な挨拶

各国の言語と代表的な挨拶を Table A11.1.1 に示す。

Table A11.1.1 Language and “Hello” in each country

Country	Language	“Good morning/ afternoon”
Brunei Darussalam	Malay	Selamat pagi/ petang
Cambodia	Khmer	Arun suo sdei/ Tiveah suor sdei
Indonesia	Bahasa Indonesia	Selamat pagi/ sinag
Japan	Japanese	Ohayo/ Kon’nichiwa
Korea	Korean	Annyunghaseyo/ Annyunghashimnikka
Laos	Lao	Sabaidee
Malaysia	Bahasa Melayu	Selamat pagi/ petang
Philippines	Filipino, English	Magandang umaga
P. R. China	Chinese	Nihao
Singapore	Mandarin, English, Malay, Hokkien	Nihao
Taipei, Chinese	Chinese, Taiwanese	Nihao
Thailand	Thai	Sawatdee
Vietnam	Vietnamese	Xin chao

付録 12 関連書籍

A12.1 英語の書籍

Knoef, H. Ed., “Handbook Biomass Gsification”, BTG Biomass Technology Group (2005)

Van Loo, S. and Koppejan, J. Eds., “Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing”, Twente University Press (2002)

Klass, D. L., “Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals,” Academic Press (1998)

Boyle, G. Ed., “Renewable Energy Power for a Sustainable Future,” Oxford University Press (1996)

Wyman, C. E. Ed., “Handbook on Bioethanol: Production and Utilization”, Taylor & Francis (1996)

Kitani, O. and Hall, C. W. Eds., “Biomass Handbook”, Gordon and Breach Science (1989)

E. S. Domalski, T. L. Jobe, Jr., T. A. Milne, Eds., “Thermodynamic data for biomass materials and waste components”, American Society of Mechanical Engineers (1987)

A12.2 日本語の書籍

日本エネルギー学会「バイオマス用語事典」 オーム社 (2006)

坂志朗「バイオディーゼルのすべて」 アイピーシー (2005)

木谷収「バイオマスー生物資源と環境」 コロナ社 (2004)

小宮山宏ら編著「バイオマス・ニッポンー日本再生に向けて」 日刊工業新聞社 (2003)

日本エネルギー学会「バイオマスハンドブック」 オーム社 (2002)

湯川英明編「バイオマスー究極の代替エネルギー」 化学工業日報社 (2002)

横山伸也「持続社会へむけて バイオエネルギー最前線」 森北出版 (2001)

坂志朗編著「バイオマス・エネルギー・環境」 アイピーシー (2001)

山地憲治、山本博巳、藤野純一「バイオエネルギー」 ミオシン出版 (2000)

坂井正康「バイオマスが拓く 21世紀エネルギー 地球温暖化の元凶 CO2 排出はゼロにできる」
森北出版 (1998)

本多淳裕「バイオマスエネルギー：生物系資源・廃棄物の有効利用」省エネルギーセンター (1986)

鈴木周一編「バイオマスエネルギー変換」 講談社 (1983)

M.スレッサー, C.レウイス著；須之部淑男, 増川重彦訳「バイオマス：生物エネルギー資源」 共立
出版 (1982)

山沢新吾編「バイオマスエネルギー」 朝倉書店 (1982)

柴田和雄, 木谷収編「バイオマス：生産と変換」 上, 下, 学会出版センター (1981)

A12.3 中国語の書籍

日本能源学会編、史仲平、華兆哲訳「生物質和生物能源手冊」化学工業出版社（2007）

小宮山宏他編著、李大寅、蔣偉忠訳「日本生物質総合戦略」中国環境化学出版社（2003）

中国農村能源年鑑編集委員会編「中国農村能源年鑑 1997」中国農業出版社（1997）