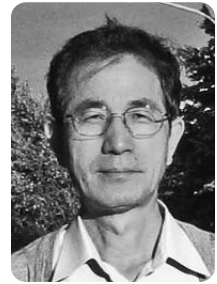


# スウェーデンにおける バイオマスのエネルギー利用について

占部 武生  
Takeo URABE

理工学部環境ソリューション工学科 教授  
Professor, Department of Environmental Solution Technology



## 1. はじめに

2008年8月中旬より約1ヵ月間、海外短期研究員としてスウェーデンのベクショー大学でスウェーデンにおけるバイオマスのエネルギー利用の調査を行った。相手先は、ベクショー大学デザイン工学部バイオマスエネルギー工学科のセトラレウス教授である。ベクショー市周辺のバイオマスエネルギー関連施設の視察などを行ったので、その内容を中心に述べる。なお、筆者の専門は廃棄物工学である。

## 2. 日本のバイオマス事情

森林を多く抱える岩手県、高知県などは、産業振興の面から林業廃棄物からチップ、ペレットを製造し、また、それらを燃料とするストーブの開発を推進してきた。

2002年国はバイオマスの利活用の推進を目的としたバイオマスニッポン総合戦略を決定し、補助金によるバイオマスタウン事業を推進してきた。現在バイオマスタウン事業を行っている自治体の数は約170(2008)である。その内容は間伐材、残材などの林地残材や建設発生木材の利活用、家畜糞尿からのバイオガス生成あるいは堆肥化など多岐にわたっている。しかし、補助金で施設はできたが、事業と

して継続していないケースもあり、多くの課題を抱えている。

その一方で石油価格の高騰やCO<sub>2</sub>削減に対する対策の一環として、産業施設でバイオマスを利用した熱電併給施設が増加してきた。その燃料は都市から発生する廃木材から製造したチップが多い。林地残材から製造したチップは安定供給やコストなどの課題を抱えている。現在、これらのチップは奪い合いの状況になっている。また、都市域から発生する紙およびプラスチックから製造した固形燃料であるRPFも同様に奪い合いの状況にあると言われている。

したがって、林地残材などのバイオマスの安定供給、低コスト化などが進めば、それが広く使われる可能性がある。

## 3. スウェーデンおよびベクショー市について

### 3.1 スウェーデン

本題に入る前に、スウェーデンの地理や歴史などについて簡単にふれる。スウェーデンはスカンジナビア半島のノルウェーとフィンランドにはさまれた国で、面積は日本の1.2倍である。

森と湖の国といわれるくらい森は53%と多く、農地は6.5%と少ない。穀倉地帯は南部に限られ、

その以北は酪農が中心である。野菜類，果物類はほとんどを輸入に頼っている。また，湖は9万以上あると言われ，最大湖の広さは琵琶湖の8.4倍である。ノルウェーに隣接する地域は2000m級の山脈地帯であるが，それ以外は比較的なだらかで平坦な地形が多い。気象的には寒帯に属し，ストックホルムの年間平均温度は東京に比べて約10℃低く，寒冷期は暖房が必須になっている。

人口は918万人（2007）で意外と少ない。1人当たりのGDPは世界10位（日本は20位，2008年資料）である。産業では，通信機器のエリクソン，自動車，航空機メーカーのSAAB，同じく自動車メーカーのボルボ，世界最大の家具チェーンであるイケアなどが有名である。また，スウェーデン鋼は上質なことでも有名である。

図1にスウェーデンの1次エネルギーの構成の推移を示す。電力供給の内訳（2006）は，原子力47%，水力43%，再生可能エネルギー7%，石炭1%，石油1%となっている。スウェーデンは1980年に行った国民投票で原発の暫時廃止を決めたが，最近CO<sub>2</sub>対策の面などからそれを見直す動きもある。なお，大型の水力発電を含むダムの建設は，環境，生態への影響などから禁止されている。また，電力の自由化，エコラベル化が進んでいる。

つぎに，スウェーデンの歴史について概説する。古代，スウェーデン・バイキングとしておもに東方で活動した。14世紀中ごろから長らくデンマークと覇権を争った。17世紀半ばバルト帝国として領

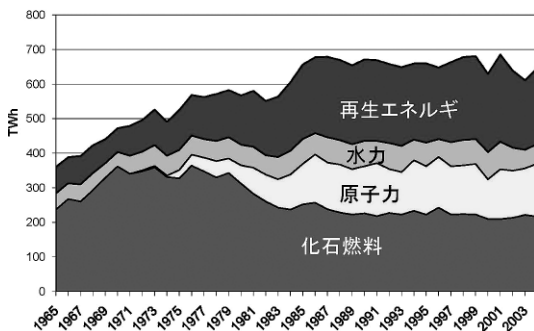


図1 スウェーデンの1次エネルギー構成の推移

土が最大となったが，18世紀初めロシア帝国との戦争で敗れた。また，1805年のナポレオン戦争にも敗れた。貧しい農業国であることが続き，1850年から1930年にかけて120万人のスウェーデン人がアメリカに移住した。第1次，第2次世界大戦では武装中立政策をとった。1932年社会民主党が政権をとって以降，経済復興や福祉政策を強力におし進めた。現在，スウェーデンは工業化が進み高福祉，高負担の国，物価の高い国，環境先進国，女性の社会参加が進んでいる国，公共セクターが多い国，労働時間が短く，5週間以上の休暇が保障された国，長寿の国，私立大学を含め大学の学費が無料の国，この180年間戦争のない国であり，国家モデルの一つとして話題にあがることが多い。1995年にはEU（ヨーロッパ連合）に加盟した。

### 3.2 ベクショー市

訪問先の大学はベクショー市にある。ベクショー市は，図2に示すようにスウェーデン南部の森林密集地帯にある7つの湖に囲まれた人口7.6万人の小都市である。ガラス王国の拠点として多くの観光客が訪れる。また，ベクショー大学の大学町でもあ



図2 ベクショー市街地（奥左），ベクショー大学（奥右）

る。なお、ベクショー市の年間平均温度は7.5℃である。

ベクショー市では、湖の汚染問題などを契機にし住民の環境意識が高まり、1980年ころから後述するVEABへのバイオマスの導入がはじまった。それに加えてローカルアジェンダ21による住民の合意形成でバイオマスの利用が進み、1996年には「2050年までの化石燃料ゼロ宣言」をした。2006年の1人当たりのCO<sub>2</sub>排出量を1993年に比べて30%減、2050年に70%削減するという目標を持っている。再生エネルギーの割合はすでに50%を超え、暖房に限れば、後述する市が保有し操業するベクショーエネルギー会社(VEAB)でのバイオマス利用により、すでにその割合は90%をこえている。ベクショー市はこうした先進的な環境政策をとっていることで世界的に知られており、2007年にはEUから欧州再生エネルギー賞を受賞している。ベクショー市のこうした地域環境政策を分析した尾形の図を図3に示す。

世界各国から訪問者が多く、ベクショー市庁への訪問はエコツアーとしてセットされ有料である。webサイトには日本語の料金表もあるぐらい日本からの訪問客が多いようである。岩手県はベクショー市にミッションを送り、日本に専門家を招いている。岩手県に招かれた専門家が今回お世話になったセトラレウス教授である。

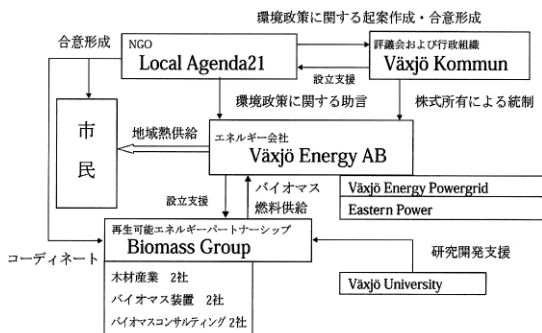


図3 ベクショー市におけるエネルギー供給と地域システム

## 4. 視察先について

### 4.1 SODRA 森林組合

SODRAは、スウェーデン南部の50%域の広さを所有する森林オーナー約5万人からなる森林組合で、従業員約3600人、純利益3000億円の大企業である。主にとうひ、アカマツなどの針葉樹を計画的に植林し、これを育成、伐採し、材木、パルプ材、木質燃料の供給施設を持つとともに、7つの紙パルププラント(ノルウェーなどの国外にもある)を持ち、最近では風力発電事業も行っている。紙パルプの生産量は世界第3位である。

SODRAの森林を図5に示す。主にとうひ、アカマツなどの針葉樹を計画的に植林しており人工林と言える。参考に示した図6は自然林で、ブナ、白樺などの広葉樹からなる。

本社オフィスはベクショー市街地に近い湖畔に建設された瀟洒な5階建ての建物であり、ここを訪ねた。内部のほとんどは木製できれいであった。対応していただいた組合員は、環境部門のオルガナイザーで、森林組合の環境問題やCO<sub>2</sub>対策を担当する若いスタッフであった。スウェーデンの他の森林組合の状況を聞いたところ、どこも成功している訳ではなく、SODRAの成功は計画性を持って事業を行ってきたことによるとの説明であった。SODRAはすべての事業に対して環境指針をつくり、伐採さ



図4 SODRA 森林組合の本社オフィス



図5 SODRAの森林（人工林）



図7 中型ハーベスタの前でSODRA組員



図6 ベクショー近くの国立公園内（自然林）

れた丸太材にはこれらの指針の一つにより伐採されたことを示す認証札がはられるとのことであった。

寒冷地のため樹木の生長は非常に遅く、アカマツは樹径が20 cm程度になるのに100年近くかかると言われている。しかし、その分年輪がつまり、世界的家具チェーンであるノキアはこうした木材を利用しており、SODRAもノキアに木材を提供している。スウェーデンは氷河の影響を受けるなどして一般に表層の土壌厚が20 cm程度と薄いため、特に針葉樹は強風で倒れやすい。最近、強風のため広い地域で針葉樹の倒木がみられた。100年単位で樹木を育成しているため、このような異常気象によると思われる強風による倒木は深刻な問題であるという

ことであった。

現地で図7に示す中型ハーベスタをみせていただいた。1人作業で伐採から仕分けができる。決まった長さに切りそろえられ、枝がはらわれた樹木は搬出され、残りの樹上や枝部は集めて現地に1年程度放置され、乾燥が進んだところで現地で移動式チップパーでチップ化され、大型車両で搬出されるということであった。ハーベスタとはまさに刈り取り機で、平地で稲を刈り取っているような感じであった。

なお、スウェーデンでは、森林由来のチップを燃料とした地域暖房施設を持つ都市が多く、それが無い地域でもストーブ用などとしてチップが用いられることが多い。国内にはチップを製造する大規模な施設がいくつか存在する。ベクショー周辺は林業が主な産業であり、図8に示すように切り出した木材を満載した貨車が多くみられた。

また、ベクショー大学の指導で図9に示すようなほとんどが木製の集合住宅の建設が進んでいた。コンクリートや鉄材をほとんど使わず、木を使えばCO<sub>2</sub>削減に大きく貢献するという話を聞くと驚いたが、残念ながら見る機会はなかった。



図 8 木材を満載した貨車



図 9 ベクショー大学の指導で建設中のほとんどが木製の集合住宅

#### 4.2 ベクショーエネルギー会社 (VEAB)

図 10 に示す熱電併給の CHP プラントはベクショー大学の前の湖の向い側にあり、ベクショー市が運営している地方公営エネルギー事業所である。1970 年初頭から地域暖房が始った。当初温水は油焼きボイラで作っていたが、1980 年代から徐々にバイオマスに移行し、最近ではバイオマスで 98.7% をまかなっている。図 11 にスウェーデンの地域暖房におけるエネルギー供給源の推移を示す。国レベルでも

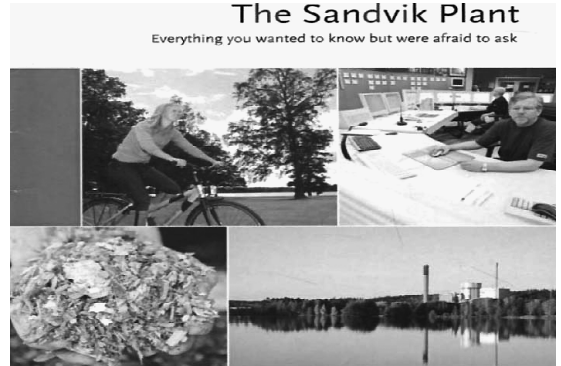


図 10 VEAB の CHP プラント

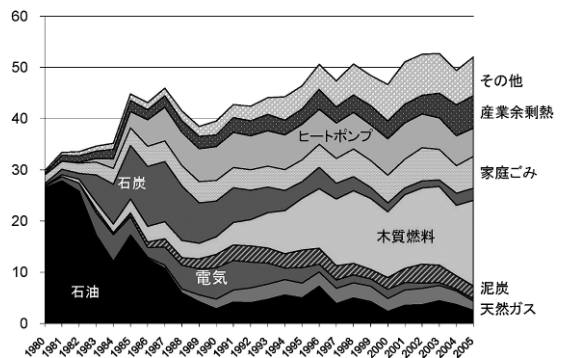


図 11 スウェーデンの地域暖房におけるエネルギー供給源

地域暖房は石油依存からほぼ脱却していることが分かる。

VEAB の最も新しい施設は 1996 年に建設された循環流動層式の施設で、過熱蒸気温度は 540℃、圧力は 140 bar である。タービンコンデンサーと排ガスコンデンサーによる熱交換で、蒸気を復水するとともに約 98℃ の温水を作っている。温水タンクは 3000 m<sup>3</sup>、高さ 30 m 程度の巨大なものである。日本の場合、空冷して復水する場合はほとんどで、熱的に大きなロスとなっている。

作った温水は図 12 に示すような断熱配管を通して供給している。温水の出温度は 98℃、戻り水温は 40℃ 程度ということであった。旧施設 (流動層式) とあわせて 1 年当たり暖房 552 GWh、電力 192 GWh (30 MW) を供給している。これで市の暖房のほとんど (5 万人分) と電力の 35% をまかなっ

ており、自治体がエネルギー供給を担っていることになる。なお、バックアップ用として油焼きボイラを持っている。

温水配管の総延長は 348 km ということであった。日本では焼却施設のせいぜい 1~2 km 内の施設に熱供給しているのみで、遠距離になると熱ロスが多く熱利用はむずかしいというのが通説になっているが、ここでは問題なく行われている。社会的に必要なインフラとして取り組んできた姿勢の違いによると思われる。

新施設は約 500 t/日のチップを燃料としている。蒸気温度が 540°C になる 3 次過熱器材は X 20 CrMoV 121 という日本の STBA 27 (12 Cr-1 Mo) に相当するフェライト系ステンレス材を使用し、6 年程度はもつということであった。筆者は高効率廃棄物発電用過熱器材の開発に係ってきた。日本のごみ焼却炉では、過熱蒸気温度が 400°C の場合でも SUS 310 (25 Cr-20 Ni) をベースにした材料が使われることが多い。それに比べて、過熱蒸気温度が 540°C と高いのに比較的安価な材料で間にあるのは、ごみ焼却炉に比べ腐食環境がきびしくないためであろう。

日本でストーブや小型ボイラーでバイオマスを燃焼させる際、炉材であるステンレス材と焼却灰が接触し有害な水溶性の 6 価クロム化合物が生成することが懸念され、筆者もその研究を行っている。そのことについて聞いたところ、焼却灰はバイオマスの栄養源をリサイクルする意味から森に 100% 還元散布しており、問題はないということであった。な



図 12 VEAB の温水断熱配管

お、他施設の場合、焼却灰は埋立処分されることが多いらしい。

間伐材などの林業廃棄物からつくられたチップは、100 km 程度の距離内から運ばれており、SODRA もその主な供給者である。野積みされたチップの山の高さは 6 m 程度であり、これは自然発火を防ぐためということであった。出所が異なるチップを均一化するため重機で投入孔に交互に入れていた。

所長と女性技術者に対応していただいた。5 週間程度の休暇をとった所長は休暇あけで、技術者はベクショー大学のエバイオマスエネルギー工学科でドクターをとるべく勉強しているとのことであった。

VEAB は、後述するブローのような規模の小さい地域暖房も行っている。また、後述するバイオマスのガス化プロジェクト VVBGC にも参加しており、ベクショー大学とも連携している。

#### 4.3 ブローの中型チップボイラ施設

ブローという地域で、約 70 世帯とボルボのトラクター製造工場へ熱供給している図 13 に示す中型バイオマスボイラプラント (3.5 MW) を視察した。熱供給のみで、発電はしていない。この施設は VEAB が操業しており、メーカーであるヤンフォー

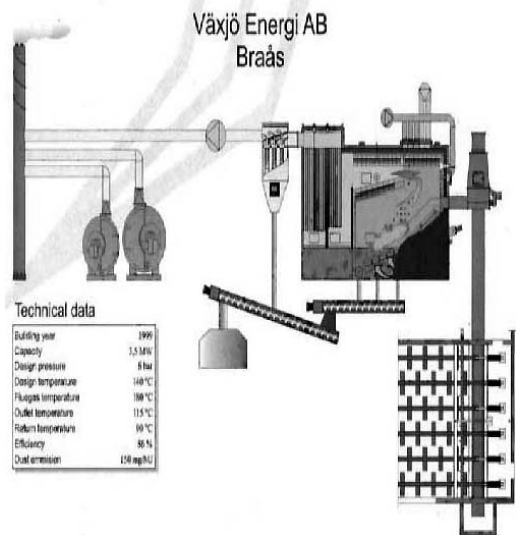


図 13 ブローの中型ボイラ

センの技術者に案内していただいた。ヤンフォーセン社は、スイスにおけるシュミット社のように、スウェーデンでは有名な中型バイオマスボイラのメーカーである。焼却炉は火格子式で運転者は1人であった。温水の温度は130℃以下、圧力は6～8 barで、自動投入、自動灰出しでボイラは縦型である。煙管内に付着するばいじんの清掃作業の効率化、機械化が課題であるとのことだった。訪問時は夏季で熱供給量が少ないため、さらに小型の火格子式ペレットボイラが稼働していた。燃烧状況をみせてもらったが、均一な灰でごみとの違いを感じた。

ここでも、チップは屋外に野積みされており、雨で水分が50%程度になっても立派な燃料であるという説明であった。この規模の煙突には特徴がある。魚のひれのようにスパイラル状に鉄板が溶接してあり、これで支持がなくても強度的に大丈夫ということであった。

#### 4.4 ヨンショーピンのトルスヴィック CHP プラント

ヨンショーピンはスウェーデンで2番目に大きいベッテルン湖畔にあり、10番目に多い人口33万人(2005)の都市で、地域暖房施設を6つ持っている。視察先は図14と図15に示す2006年に稼働した最新のCHPプラントで、市街地から約10km離れた所に立地している。火格子式の焼却炉で約500t/日の焼却能力があり、家庭系ごみ、産業系ごみ、それにバイオマスを混焼している。日本では、原則家庭系廃棄物と産業廃棄物の混焼は認められていない。熱利用に徹底している姿勢は日本と異なっている。しかし、さすがに産業系から時折混入する大きな鉄材などが操業の弊害になっているとのことだった。

寒冷期には、発電後タービンコンデンサーと排ガスコンデンサーで蒸気を復水にする熱交換プロセスにより温水を作り地域暖房に利用している。年間当たりの発電量は100GWh(16.2MW)、地域暖房量は340GWh、主温水配管長は250kmである。温水



図14 ヨンショーピンのCHPプラント

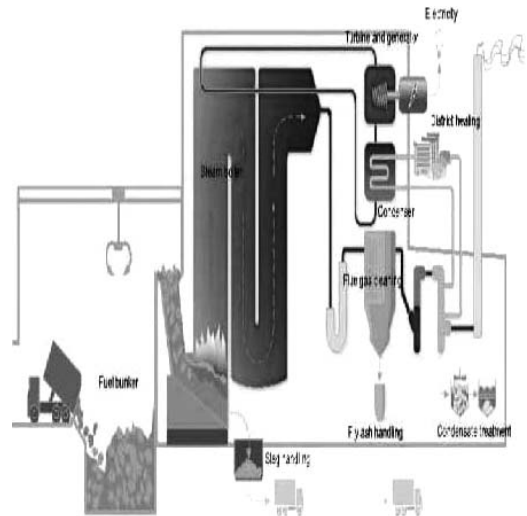


図15 ヨンショーピンのCHPプラントのフロー

の出温度は80～110℃、戻り温度は45℃ということであった。

過熱蒸気の温度は380℃、圧力は41 barで、VEABの新施設に比べて低い。これは、バイオマス以外に家庭系や産業系のごみを焼却しているため腐食環境がきびしく、そのため過熱蒸気温度を低めに設定している。このほかの本プラントの特徴として、火格子は水冷式、燃烧室の水管壁のかなりの部分に高級





技術開発を行う際、バイオマスの投入、ガス化温度（800～1200℃）、高温フィルター（400～800℃）、触媒、ガス改質（800～1200℃）のための酸化材（ $H_2O$ 、 $O_2$ ）などをどうするかが問題になる。このうち、メタンガスやタール成分を分解して  $H_2$ 、 $CO$  ガスを生成する触媒はニッケルが有望であり、その他の条件については絞り込み中ということであった。

なお、バイオマスからの輸送用燃料の比率について、EU では 2010 年までに 5.75%、2030 年までに 25%、スウェーデンでは 2012 年までにこれより高い 10%、2020 年までに化石燃料への依存を 40～50% 減らすという目標を立てている。化石燃料からの脱却をめざした意欲的な研究開発といえる。

高圧プラントであるため、プラントのダクトや接続部分の鋼板は 2 cm レベルの厚さであり、常圧に近い焼却炉を見なれた筆者からすると、大変な技術だという印象を受けた。日本でもバイオマスのガス化、触媒によるガス改質などに取り組んでいる企業はあり、研究者はいるが、国レベルでのビッグプロジェクトはないと思う。

#### 4.6 MBIO バーナ会社

図 19 に示すノルウェー製の家庭用ストーブの販売と、図 20 に示す小型バイオマスボイラー用バーナの開発を行っている MBIO バーナ会社を訪問した。国の補助金カットでストーブの売れ行きはかなり落ちこんだという。バーナの開発は、油焚きボイラーのバーナ部をバイオマス用に入れ替えることを目

的とし、燃焼温度による自動制御で 1,000℃ の燃焼温度を開発目標としていた。ペレットを砕いて細かくし、これを自動供給し、燃焼床部分を回転させることなどにより、小型バーナでありながら燃焼温度 1000℃ が得られると聞いて少々驚いた。

#### 4.7 ベクショー大学とバイオマスエネルギー工学科

ベクショー大学は、北欧最大のルンド大学から 1999 年に独立してできた新しい国立大学である。学生数は 15000 人で、留学生は 300 人と多い。図 21 に大学本館を示す。教育・研究施設に隣接しこれらの面積より広い芝生にマンション風なきれいな寄宿

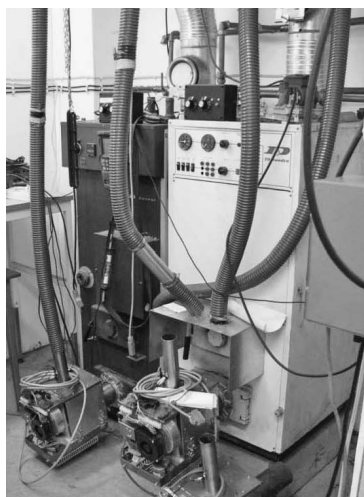


図 20 開発中の石油焚き家庭用バーナの代替ペレットバーナ



図 19 ストーブ販売の店頭（フィンランド製）



図 21 ベクショー大学本館

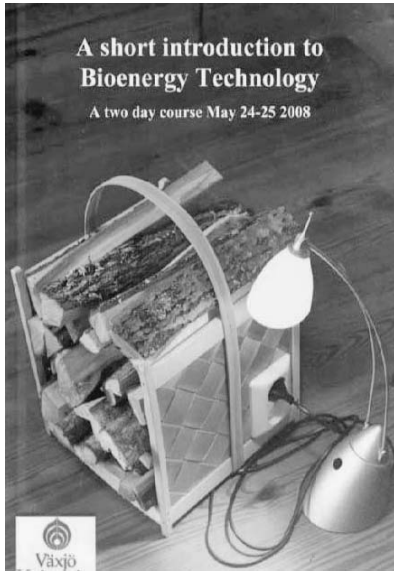


図 22 バイオエネルギー技術講習テキストの表紙

舎が立ち並んでいた。

お世話になったバイオマスエネルギー工学科は、最近できた学科で、バイオマスのエネルギー利用を専門としている。このような学科は日本にはなく、世界的にも珍しいと思われる。しかし、学生を確保するのに苦労されているようであった。その一方で、バイオマスエネルギーの国際セミナーを開いたり、日本などを対象とした web 授業も行っている。セトラレウス教授はこの分野で著名な人で、多くの論文を出されているほか、図 22 に示すような実務的なテキストも出されている。

学科のカリキュラムに興味があり、教えていただいた。科目としては、材料科学、燃焼工学、エネルギー工学、変換工学、プロセス設計、分析、エネルギーシステムとその計画、持続エネルギー工学、バイオマス資源の評価等があり、バイオマスエネルギー工学を体系的に教えておられるという印象を受けた。また、十数人が入れる程度のスペースの教室が多く、少人数教育がされていた。

## 5. おわりに

以上の視察などを通じて得た感想を以下にまとめ

る。スウェーデンは寒冷地のため暖房が不可欠であるが、地域暖房に使用する燃料の石油燃料からバイオマスへの移行はほぼ完了している。さらに、EU の開発プロジェクトでもあるが、バイオマスから輸送用燃料の製造を目指した開発を実証レベルで着実に進めている。

日本では、木材の低価格などが影響し、林業そのものが低迷している状況にある。しかし、森林が多いことをメリットとしたうえで、石油資源の枯渇や CO<sub>2</sub> 対策などの面から林業の見直しを行い、課題克服に努める必要があると思われる。今回の視察でバイオマスにかかわる企業、大学のマンパワーと歴史というものを強く感じた。そう遠くない将来を考えても、バイオマスのエネルギー利用は今後進むべき方向の一つであることは確かと思われる。地形の差などはあるが、スウェーデンが進めている方策、技術を参考にする必要性を感じた。

## 参考文献

- 1) スウェーデン・持続可能な発展省,  
<http://www.sweden.gov.se/sb/d/2066>
- 2) ベクショー市役所, <http://www.vaxjo.se/>
- 3) ベクショー大学, <http://www.vxu.se/english/>
- 4) ベクショー大学バイオマスエネルギー工学科,  
<http://www.vxu.se/td/english/bioenergy/>
- 5) SODRA 2006/2007 レポート
- 6) VEAB 資料
- 7) Torsvik 資料
- 8) VVBGC 資料
- 9) A short introduction to Bioenergy Technology, Vaxjo university (2008)
- 10) 尾形清一, スウェーデン・ベクショー市における地域環境政策の分析—ローカルアジェンダ 21 による合意形成と地域システムの形成, 政策科学, 13, 1, pp. 29–41 (2005)
- 11) 岡沢憲美, スウェーデンの挑戦, 岩波新書
- 12) 岡沢憲美, 中間真一, スウェーデン—自律社会を生きる人々, 早稲田大学出版部
- 13) 飯田哲也, 北欧のエネルギーデモクラシー, 新評論