

## 論文の内容の要旨

論文題目 木質バイオマス資源有効活用に向けたプロセス技術の  
評価と技術シナリオの提案  
氏名 海邊 健二

我が国は国土の約7割を森林が占め、その賦存量はエネルギー換算すると年間1次エネルギー消費量の約2倍（44EJ）[1]とされている。また木質バイオマスは、多くの地域で利用可能なカーボンニュートラルのエネルギー資源として、その利用に注目が集まっている[2-4]。

そのような中で日本のエネルギーの利用状況や森林資源・林業を取り巻く環境、木質バイオマスのエネルギーの利用拡大に向けた課題などを踏まえ、我が国において木質バイオマスを燃料とするバイオマス発電は、①火力発電などの代替エネルギー/補完エネルギーとなりうる、②化石燃料以外の持続的に利用することができるエネルギー源を利用する、③二酸化炭素などの温室効果ガスをほとんど排出しない、④経済合理性のある発電方法になりうる、という条件を満たすことができる潜在能力が高い有望な技術の1つと考えた。

その一方で日本における林業は経済的に自立することが厳しい状況にある。その結果、人手不足などによって森林の荒廃が進んでいる地域もあり、温室効果ガスである二酸化炭素固定能の低下など様々な問題が生じている。そのような背景から林業を再生し、森林資源を活用するという社会的要請が強く、森林資源を生産から利用までを見通した上で林業が経済的に自立するために必要となる技術開発の方向性や課題の解決策などを示した技術シナリオの提示が求められている。既存の研究報告では現状分析や地域研究、部分的な技術開発提案に留まっており、森林資源の生産から利用までを見通した上で、①モデル設計による課題抽出と改善提案を行い、②プロセスモデルによる技術開発の方向性の予測までを行っている例はない。

本研究では、日本における木質バイオマスに関し、生産から利用までのライフサイクル全体を対象として、熱力学的観点や化学工学的観点を取り入れながらプロセスモデルの設計による経済性評価を通じて、エネルギー利用も踏まえた新しい林業システムの設計し、経済性/環境性の観点から利用拡大に向けた技術的課題を抽出した上で、新技術プロセス設計と利用拡大に向けた技術開発の方向性を技術シナリオとして提示することを目的とする。

本研究の構成は以下の通りである。第1章では、本研究の背景、目的、及び全体概要を述べた。第2章、第3章、第4章では、本研究の評価範囲である木質バイオマスのライフサイクルを「木質バイオマスの生産・供給」、「燃料製造」、「エネルギー利用」にわけた各プロセスにおける経済評価及び抽出された技術課題とその解決策などの結果を述べた。第5章では第4章で対象とした既存で確立されつつある直接燃焼型バイオマス発電（DC発電）、バイオマスガス化発電（GS発電）と、次世代の有力技術の1つと目されている化学ループ法（CLC）によるバイオマス発電のうち、CLCによるバイオマス発電について、プロセスの詳細設計を行い、経済性に大きな影響を及ぼす要素の抽出による将来の開発の方向性などについて述べた。第6章では、以上の結果を受けたまとめ及び今後の展望を述べた。

具体的方法として、木質バイオマスの利用拡大に向けた技術的課題の抽出にあたっては、現地調査やプロセス設計に基づき、前述の3つのプロセスについて「木質バイオマスの生産・供給」では作業レベルで、「燃料製造」、「エネルギー利用」では、機器レベルまで詳細に分割した上で、プロセス毎にコスト関数化/定量化を行い、コストの構造化をした。木質バイオマスのエネルギー利用における本研究の概念図を図1に示す。コストの構造化にあたっては、現地調査等に基づく実際の運用状況を把握しつつ、その比較によってモデルの妥当性を確保した。また本モデルは、プロセスを構成する機器やオペレーション条件などの

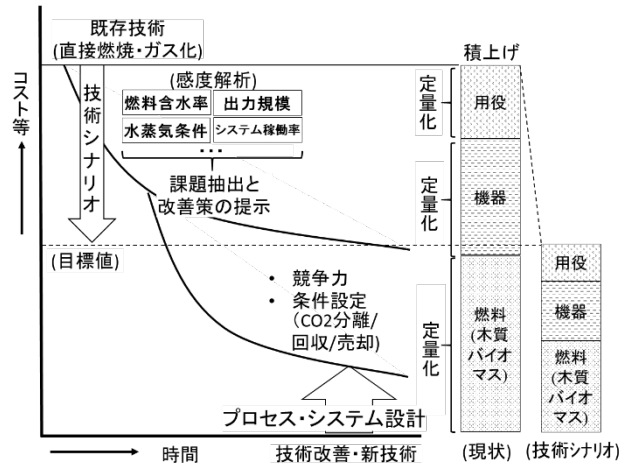


図1 木質バイオマスのエネルギー利用における本研究の概念図

データベース化によって、機器や条件設定等の様々な組合せを柔軟にできるようにし、多様なプロセス毎に評価ができる柔軟性を確保した。これらのプロセスモデルを用いて、コストを形成する各要素(例として、発電時の温度条件や圧力条件、木質バイオマスの含水率など)について感度解析を行い、各要素において最もコストに影響を及ぼしている要素と経済合理性が高くなる最適条件を抽出した。さらに系統電力と同等の経済合理性を有するために必要となるコスト目標を設定し、それらを達成するために必要となる新技術プロセス設計や利用拡大に向けた技術開発の方向性を技術シナリオとして提示した。

「林業活性化と森林資源の有効利用に向けた課題と改善策」

日本の地域別の木質バイオマスの生産コストをプロセスごとに積み上げて算出した結果、その低減に大きな影響を与える要因として、①材積が多いこと及び、②平均傾斜度が緩やかであることが明らかになった。それを踏まえ造林・伐採の工程における更なるコストを低減の可能性を検討し、定量的示した。技術シナリオを適用した場合の都道府県別の木質バイオマス生産コストに対する傾斜の影響(全斜面加重平均)を図2に示す[5]。

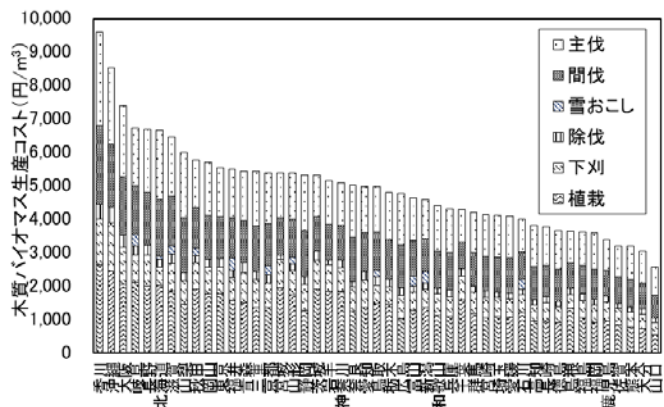


図2 技術シナリオを適用した場合の都道府県別の木質バイオマス生産コストに対する傾斜の影響(全斜面加重平均)

緩斜面における造林コストは、栽植密度の疎化や下刈り回数の減少による労働量の削減により現状の約4,400円/m<sup>3</sup> から約1,400~約2,600円/m<sup>3</sup> まで低減できる可能性が示された。さらにコンテナ苗や大苗の開発による植栽費用の低減や、機械化促進による労働生産性の向上に伴う地拵え費用が低減できる可能性があり、将来的にさらにコストを低減できる潜在的可能性を有している。

伐採の作業体系は傾斜毎に異なるが、施業機械体系の効率化や、施業する森林を集約化による稼働率の向上により伐採に要するコストは現在の約6,600円/m<sup>3</sup> から、約1,300~2,800円/m<sup>3</sup> まで低減できる可能性がある。

その結果、地拵えから伐出まで一連のプロセスを対象としてプロセスごとに詳細な積み上げ法に基づいて木質バイオマス生産コストの評価を試みることにより、日本の現在の木質バ

バイオマスの生産コストは全国平均で約11,000円/m<sup>3</sup>と目標とするスウェーデンと比較して単位材積当たりで4倍以上高いことが明らかになった。それを踏まえ、造林コストの低減策として、低密度植林や下刈回数の削減、伐採コストの低減策として、高性能林業機械の導入と欧州並みの運用体制を適用による稼働率の向上によって生産コスト現状の約3分の1の3,000円/m<sup>3</sup>程度まで低減できることが明らかになった。

「木質バイオマスのエネルギー利用拡大に向けた技術的課題と改善策」

木質バイオマスの利用拡大に向けて、既に普及しつつあるDC発電/GS発電及び次世代の発電技術と目されるCLCを対象に、それぞれの発電種別のプロセスを確定した後、発電システムのエネルギー効率及び発電コストを詳細な積み上げ法により算出した。本研究の評価方法を図3に示す。続いて木質バイオマスのエネルギー利用が拡大するために必要となる発電コスト目標を設定した上で、木質バイオマスの利用拡大に向けて解決すべき技術的課題(タービン効率の改善等)や条件(出力規模、燃料含水率、システム稼働率、二酸化炭素の分離・回収等)について技術シナリオとしてまとめた。

具体的には、500 kWから10,000 kWの範囲で出力規模がコストに及ぼす影響について感度解析を行ったところ、出力規模の拡大のみでは設定した発電コスト目標を達成することはなかった。発電種別毎に発電コストの構造を解析したところ、運転維持・資本費に最も大きな影響を与えている要素はシステム発電効率であり、さらにその内訳を解析したところ水蒸気及びガスを動力に変換するランキンサイクル(DC発電/CLC)及びブレイトンサイクル(GS発電)でのエネルギー変換時における損失が最も大きいことがわかった。DC発電(5,000kW)におけるヒートフロー図を図4に示す。次にDC発電及びCLCにおいて、ランキンサイクルにおける蒸気温度を300℃から540℃、圧力を0.1 MPaから15 MPaの範囲で各条件を組み合わせ、各サイクル効率を算出した上で500 kWから10,000 kWの出力規模において発電コストを算出したところ、3,000 kWの時にコスト低減効果が最も発揮されることが分かった。DC発電における蒸気条件変更による発電出力と発電コストの関係図5に示す。GS発電ではブレイトンサイクルの効率が出力規模に関わらず、ほぼ一定となることから設定したコスト目標を達成することが困難であることが分かった。続いてDC発電及びCLCについて、燃料条件やシステム稼働率などの諸条件を変更させた場合に設定した発電コスト目標(二酸化炭

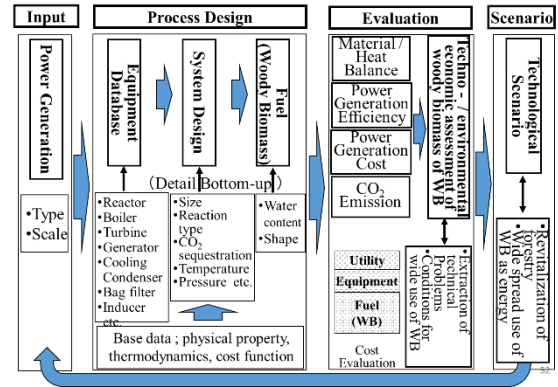


図3 本研究における評価方法

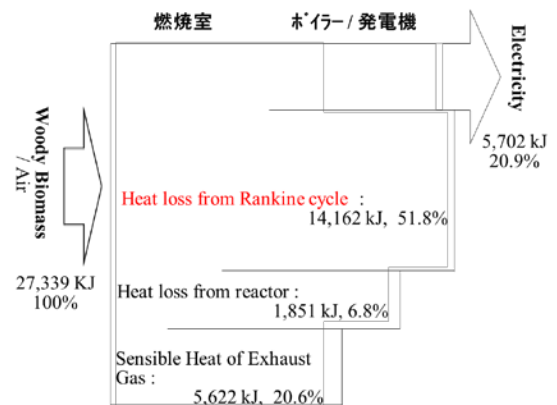


図4 DC発電(5,000kW)におけるヒートフロー図

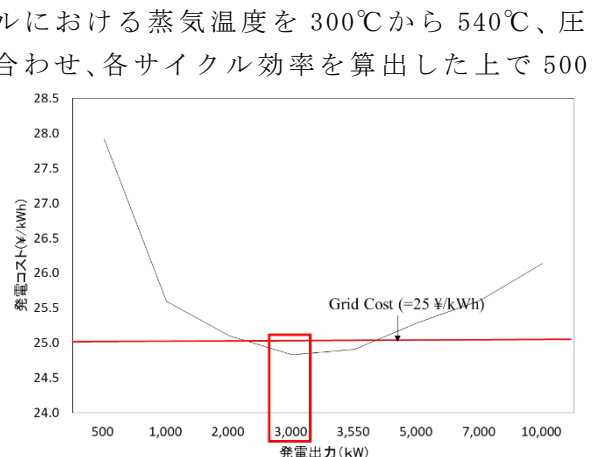


図5 直接燃焼型バイオマス発電における出力規模と発電コストの関係

素分離・回収無：25.0 円/kWh, 二酸化炭素分離・回収有：27.3 円/kWh)を下回る条件を二酸化炭素の分離・回収の有無に分けて抽出した。木質バイオマス自体のコスト（輸送費は別途を必要）が現状の3分の1程度(2,900 円/t)まで低減する前提のもとで、二酸化炭素の分離・回収がない場合は、最も発電コストが低いDC発電において、システム稼働率90%(330日/年)、燃料含水率25%の条件下でボイラーの蒸気条件を520℃～540℃まで高温化させ、圧力を14-15 MPaまで高圧化することで発電コストが設定した発電コスト目標とほぼ同等まで低減できることがわかった。二酸化炭素の分離・回収がある場合について、新たな装置・エネルギーを必要とせず最もコスト競争力があるCLCにて蒸気条件を変化させて発電コストを試算したが、設定した発電コスト目標を達成することはできなかった。そこで、さらに分離・回収した二酸化炭素を売却する場合についても検討を行った。CLCの発電に伴い発生する高純度の二酸化炭素を60%程度捕捉し、平均的な炭酸ガスの市場販売価格(約20,000 円/t)の10分の1程度で売却した場合、約2-5 円/kWhの発電コスト低減要因となり、設定した発電コスト目標を達成できることがわかった。CLCバイオマス発電におけるランキンサイクル効率と発電コストの関係を図6に、コストモデルと技術シナリオを図7示す。

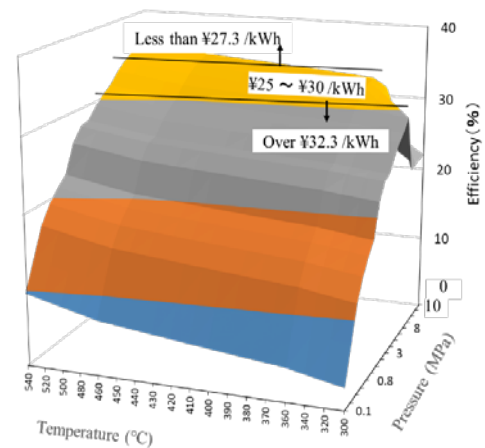


図 6 CLC におけるランキンサイクル効率と発電コストの関係

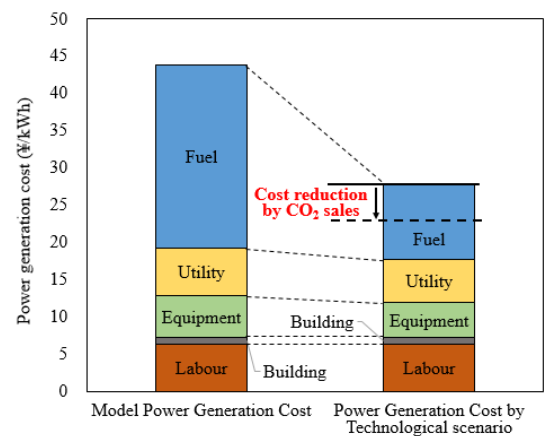


図 7 CLC におけるコストモデルと技術シナリオ

以上より、DC発電は二酸化炭素を分離・回収しない場合において、蒸気を高温高圧化することで設定したコスト目標と同程度まで低減できることがわかった。また、CLCでは発電に伴って発生する二酸化炭素を分離・回収した上で売却することができれば、現状の蒸気条件でそれぞれ発電コストが設定した発電コスト目標を達成できる。このことから木質バイオマスのエネルギー利用に関し、条件設定によって利用拡大に大きな可能性を有していることが示された。

(参考文献)

[1] 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 低炭素社会づくりのための総合戦略とシナリオ, 2012.  
 [2] M.I. Takuyuki Yoshioka, Hideo Sakai, Hiroshi Kobayashi, Feasibility of a harvesting system for logging residues as unutilized forest biomass, Journal of Forest Research 5 (2000) 59-65.  
 [3] 小池浩一郎, 木質バイオマスエネルギーによる地球環境と地域経済への貢献, 森林科学 33 (2001) 44-50.  
 [4] 農林水産省, バイオマス活用推進基本計画, 2010.  
 [5] 浅田龍造, 海邊健二, 大友順一郎, 山田興一, 木質バイオマスの生産コスト構造とその低減策, 日本森林学会誌 99(5) (2017) 187-194.