

様式 I

博士学位論文調査報告書

論文題目

Investigation of Economic Feasibility of Fusion-Biomass Hybrid System
in the Future Energy Markets

(将来のエネルギー市場における核融合バイオマスハイブリッドシステムの
経済可能性分析)

申請者 南昊錫 (ナム ホソク)

最終学歴 平成 31年 3 月
京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻博士後期課程
(修了見込)

学識確認 平成 年 月 日 (論文博士のみ)

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科
(主査) 教授 小西哲之

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科
教授 手塚哲央

調査委員 京都大学大学院エネルギー科学研究科
講師 八木重郎

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	南昊錫 (ナム ホソク)
論文題目	<u>Investigation of Economic Feasibility of Fusion-Biomass Hybrid System in the Future Complex Energy Markets</u>		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、核融合とバイオマスのハイブリッドシステムの、将来のエネルギー市場における可能性について、経済的な成立性を、核融合プラントのプロセス概念設計、経済的な観点でのコストや投資回収性に関する評価、バイオマス熱分解に関する実験に基づいて検討し、一方ではエネルギー市場の特性に関する考察に基づき、そこでの投資回収戦略とその可能となる領域の感度解析に基づく考察を通じて成立性と将来のエネルギー環境問題における意義を論じたものであり、全 5 章よりなる。</p> <p>第 1 章は序論で、まず世界の核融合炉開発および設計の状況、特にプラズマからのエネルギーを各温度領域において変換するブランケット概念に着目して概観し、熱源としてバイオマスの転換プロセスに用いることができることから、それに応じたエネルギー利用法と、異なる市場への参入が可能であることから核融合の熱利用法の観点で本研究の対象を定義した。一方エネルギー市場の将来動向を考察し、電力市場では自由化と再生可能エネルギーの大幅導入により価格が変動し、電力による投資回収に制約があることを指摘し、一方二酸化炭素排出権市場の可能性と、クレジット価格が今後大幅に増加する見通しから、本論文の対象とする市場適合性評価の問題設定を行っている。</p> <p>第 2 章では、核融合によるバイオマスの吸熱分解で得られたガスを、フィッシャートロプシュ合成により液体燃料とする場合と、燃料電池に供給して発電することと、通常の熱機関を用いた発電で得られる電力についてモデル化して投資回収性の観点で比較した。核融合発電が電力市場において競争力を持ちうるコスト条件において、廃棄物起源の低コストバイオマスを原料に用いた場合、相対的に核融合から熱機関により得られる電力よりも SOFC 燃料電池発電が、より高い競争力を持ちうることをシステムダイナミクス分析によって明らかにし、またその経済的な成立領域を示した。熱機関による核融合発電は競争力を持つためには、スケールメリットを得る必要があり、一方液体燃料と燃料電池発電の比較においては感度解析により SOFC については発電効率、バイオマスからの FT 合成軽油については補助金政策が高い影響力を持つことを明らかにした。</p> <p>第 3 章では、バイオマスガス化に続いてシフト反応で生成する水素と FT 合成による液体燃料を概念設計に基づくプラントモデルで分析し、将来のクリーンエネルギー市場における競争力を検討した。核融合熱源コストについては、前章同様発電市場で競合可能なレベルが技術的に可能であり、液体金属冷却で高温熱源として利用可能な 300MW 級の小型炉について CO₂ 排出および二酸化炭素回収隔離 (CCS) 技術にかかるコストまでを含めて損益分岐点とそれに及ぼす因子の感度を解析した結果、いくつかの考慮すべき特性を抽出している。水素、合成燃料共に競争力を十分持つこと、設備利用率、および二酸化炭素削減能力に対する政策的補助の影響が大きいことを見出した。また、バイオマスを用いた CCS 技術として、人類のエネルギー利用にかかる二酸化炭素排出を正味で負の値にする効果としての重要性を指摘した。</p>			

第4章では、バイオマスの炭化プロセスによる二酸化炭素隔離効果に関する分析を行っている。まず、低酸素濃度下でのバイオマス炭化反応をセルロースとリグニンについて熱化学的分析実験によって検討し、処理温度と木炭収率の関連を測定した結果、両者について反応は290℃以上で進行し、310℃で完了すること、セルロース、リグニンでそれぞれ木炭の収率は20%~35%, 83%~87%であることを見出した。さらに生成木炭が常温常圧で極めて長期に渡って二酸化炭素を大気から隔離できること、そのまま CCS 代替技術として二酸化炭素排出権クレジットと交換可能であることを指摘し、核融合エネルギーの市場価値を大気中 CO₂ の固定隔離効率とエネルギー変換の観点で比較検討した。代表的な木質バイオマスがセルロースとリグニンを等量含むと仮定し、また炭化反応が初期の水冷却ブランケットによる核融合プラントで可能であることから、2050年以降の比較的近未来の排出権クレジット価格と比較し、電力としての販売と同等ないしそれ以上に投資回収効果が見込めることを明らかにした。特に、近未来において想定される約40~70\$/CO₂トンが損益分岐点になり、その支配的な因子がプラントの運転コストであること、これが同時期における発電設備コストとして想定した4000\$/kwと等価であることを示した。また地球環境問題についても CCS 代替技術として大きな可能性があることを指摘している。

第5章は全体のまとめであり、核融合エネルギーの熱利用をバイオマスと組み合わせることにより、将来のエネルギー市場において発電、燃料、二酸化炭素削減・隔離の効果を通じた貢献が可能であり、またその組み合わせがプラント構成上可能であることから、最適戦略としてこれら複数のエネルギー市場への参入を選択することが、核融合の投資回収能力で評価した場合の経済的成立性を高めることを明らかにした。さらに、このような複数のエネルギー利用技術を選択すべき局面において考慮すべき経済的要因を総合的に評価手法としてシステムダイナミクスを用いたモデル化を用い、定量的な結果から技術的経済的な最適化を行う方法論として報告している。一方、地球環境問題と人類の持続可能な開発の観点では、人類活動による大気中二酸化炭素濃度の上昇を抑制し、逆に減少に転ずる可能性のある技術としての意義があることを指摘している。

論文全体として、以上の結果が、核融合の経済的成立可能性からその開発方針に示唆を与え、エネルギー商品としての成立性を向上することから、技術的な早期実現への可能性を高める成果として記述されている。また、エネルギー科学の研究結果として、エネルギー環境問題における人類の持続可能性への貢献のための戦略、エネルギー技術開発の社会実装を以て解決を与えるための画期的な方法論として提示されている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、将来の核融合プラントのエネルギー市場への導入可能性を検討し、電力市場、非炭素依存燃料市場、および温室効果ガス排出権市場の3種についてその特性に着目し、核融合を高温熱源として技術的特性からその市場適合性を分析して投資回収可能性を評価し、導入戦略を考察した研究成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

- (1)核融合エネルギーの熱機関による発電以外の利用法として熱源を検討し、バイオマスの吸熱ガス化反応により、化石代替燃料の製造、燃料電池と組み合わせた発電、およびガス化とともに炭化反応で得られる炭素隔離の各プラント概念を設計し技術的な可能性を評価した。その結果に基づき、それぞれの技術的要素をブランケットの運転温度領域に着目して比較分析し、同じ核融合炉に対して燃料電池を用いた電力供給、ガス及び液体燃料の供給、また独創的利用法として炭化反応で生成する木炭を大気中 CO_2 の固定隔離に用いることによる排出権の生成、の可能性のあることを熱化学的分析実験の結果を踏まえて示した。この結果を総合し、相対的なエネルギー転換効率の評価方法を開発した。
- (2)次にそれらのプロセスのプラント概念設計を行い、システムダイナミクスモデルを構築して経済性を分析した。投資回収性と利益について、稼働率やエネルギー効率、補助金政策による誘導など各種要因に対する感度を分析し、支配的になるパラメータと経済的な成立可能領域を明らかにした。
- (3)さらにそれらの結果をもとに、核融合—バイオマスシステムの将来エネルギー市場における寄与、可能な導入戦略、および地球環境問題における寄与を論じて、影響因子と成立可能領域を明らかにした。

以上の結果から、核融合エネルギー開発において、熱源としての利用が、電力、代替燃料、二酸化炭素隔離による排出権クレジットの創出、という相互に互換可能な選択肢を持つことを初めて明らかにした。またそれぞれの市場の将来における特性と核融合の持つ技術的特徴の対応から、従来知られていなかった投資回収可能性の高い戦略が、具体的な導入に際して選択可能であることを明らかにした。特に、再生可能エネルギーとの競合ではなく、バイオマスとのシナジー効果による大気中 CO_2 の永続的隔離という、将来社会の持続可能性に大きく貢献し、そこに先進的なエネルギー源の適合のための方法論を明らかにしている。これはエネルギー環境問題に大きな貢献を示しうる独創的な成果であって、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成30年2月22日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降