

平成 29 年度防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

成果報告書

可搬式超小型バイオマスガス化発電システムの開発

平成 30 年 3 月
東京工業大学

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、東京工業大学が実施した平成 29 年度「可搬式超小型バイオマスガス化発電システムの開発」の成果を取りまとめたものです。

1. 0 委託業務の目的

本研究では、炭化と炭化物のブリケット化を組み合わせ、様々なバイオマス資源からほぼ均質な炭化物ブリケット燃料を製造し、かかる燃料を新たに開発するダウンドラフト型炭化物ガス化炉によってガス化し、生成されるガス燃料をオイルスクラバー・遠心分離式タール回収機・炭化物フィルターを組み合わせ新たに開発する簡易なタール除去・ガス精製プロセスで精製した後に、エンジン発電機に導いて発電を行う、可搬式のコンパクトなトータルシステムの試作機を製作し、野外でのフィールド試験を経て、下記の目標をすべて満たすバイオマスガス化発電システムの技術実証をめざす。

- 1) 野外に存在する様々な形状や含水率50%程度以下の多様な有機物に適用可能な設備であることの実証。
- 2) 電力や水、燃料の供給インフラが整備されていない野外で適用可能な自立した設備であることの実証。
- 3) 専門の運転員ではなく、一般人が、簡単なトレーニングを経て安全に運転できる設備であることの実証。
- 4) 使用する補助燃料は他の装備（例えば車両や重機）でも必要とされるものであり、その消費量が最小限であることの実証。
- 5) 本研究で試作する設備で所要電力を上回る発電出力が得られることの実証。
- 6) 本研究終了時まで、100時間以上の連続発電の実証。
- 7) 処理を要する廃棄物を発生させないことの実証。
- 8) 有害な排ガスや排水の発生によって、周辺環境に悪影響を及ぼさないことの実証。

なお、平成28年度までの研究成果より、ペレット燃料はブリケット燃料よりも成形が容易で、作業効率が高く、また、粒径が小さいため空気との接触面積が大きくなることからガス化効率の向上も見込まれることがわかった。このため、ブリケット燃料に加えてペレット燃料についても製造方法、ガス化特性について評価し、ブリケット燃料、ペレット燃料またはブリケットとペレットの混合燃料のうち、最適な燃料を選定する。

また、当初計画では、炭化物ガス化炉はタール発生量を抑えるために、タールを高温で分解可能であるが、生成されるガス燃料の温度が高く、ガス燃料の冷却が困難なダウンドラフト型を用いる予定であった。しかし、本研究では、炭化物を燃料として用いることでタール発生量を低く抑えており、さらに、高性能オイルスクラバーの開発により、発生したタールも高効率で除去可能となった。このため、ダウンドラフト型と比べ、タールの分解性能は低下するが、生成されるガス燃料の温度が低く、冷却が容易なアップドラフト型を用いる。

1. 1 研究開始時に設定した研究目標の達成度

- 1) 野外に存在する様々な形状や含水率50%程度以下の多様な有機物に適用可能な設備であることの実証。

平成28年度には、各種バイオマス資源の炭化実験を行い、その結果を表1.1に示す。含水率が高くなるほど、炭化物1kgを製造するのに必要な総バイオマス消費量（SFC値）が増加するものの、含水率が50%以下の様々な性状のバイオマス資源に対して、問題なく炭化が行えることがわかった。以上より、本目標は平成28年度に達成されたと評価さ

れる。

表1.1 種々のバイオマス資源の炭化プロセスの物質収支

炭化対象物	炭化炉内投入量/kg	含水率/%	炭化炉内投入量(乾燥ベース)/kg	燃焼用木材量/kg	総バイオマス消費量/kg	SFC/kg·kg ⁻¹
乾燥木-400°C	88.2	12.0	77.6	22.9	100.5	3.6
廃木材/木片-400°C	80.5	44.9	44.3	51.0	95.3	7.1
米/木片-400°C	70.0	10.0	63.0	28.0	91.0	4.8
樹皮-400°C	22.1	20.0	17.7	18.8	36.6	7.7
乾燥木-475°C	83.5	7.3	77.4	21.5	98.9	4.1
高含水木チップ-475°C	98.7	33.3	65.8	42.0	107.8	6.6

表 1.2 工業分析結果

	乾燥木質	木質炭化物	木質炭化物 ペレット	乾燥生ゴミ	生ゴミ炭化物	生ゴミ炭化物ペレット
揮発分 %	82.19	36.21	43.55	78.32	39.71	51.42
固定炭素 %	15.71	58.93	50.79	19.48	50.17	33.67
灰分 %	2.10	4.86	5.66	2.20	10.12	14.92
低位発熱量 /MJ·kg ⁻¹	17.9	29.9	30.0	12.1	19.0	21.5

注: 乾燥ベース

表 1.3 元素分析結果

	乾燥木質	木質炭化物	木質炭化物 ペレット	乾燥生ゴミ	生ゴミ炭化物	生ゴミ炭化物ペレット
水素%	5.62	2.51	3.87	6.83	4.06	3.82
炭素%	46.18	80.21	74.67	46.91	46.06	53.36
窒素%	1.25	0.43	0.55	6.10	3.86	4.22
酸素%	42.58	13.56	16.95	37.35	18.86	20.26
灰分 %	2.70	3.29	3.66	2.20	27.00	15.90

注: 乾燥ベース

そこで、平成29年度は、より高い目標の達成をめざし、フィールド試験の一環として、フィールド試験実施場所である常盤館の厨房で発生した、含水率が71%の生ゴミの炭化試験を試みた。生ゴミの場合は、含水率が極めて高いため、最初に、炭化炉で予備乾燥させた後に炭化を行い、ペレット成型した。比較のため、木質と生ゴミのそれぞれの乾燥試料、炭化物試料ならびに炭化物ペレット試料の特性値を表1.2および表1.3に示す。

含水率が50%程度以下の有機資源の活用を当初の研究目標として掲げたが、目標含水率を大きく越える生ゴミであっても、乾燥木質とほぼ変わらない性状の炭化物ペレットの製造が可能であることが実証された。本研究成果は、

後述するように、今後の本研究の展開に新たな道を切り開くこととなった。

2) 電力や水、燃料の供給インフラが整備されていない野外で適用可能な自立した設備であることの実証。

後述するように、平成29年度は、電力と水の供給インフラはあるが、燃料の供給インフラのない長野県小諸市の常盤館の駐車場横の空き地を借用し、100時間連続のフィールド試験に成功した。炭化からガス化発電まで、設備をフル稼働させた時の所要電力は12kWであるのに対して、フィールド試験の前半では平均して18kWの発電出力、後半でも14kWの発電出力が得られており、電力の供給インフラが整備されていなくても、自立した運転が可能であることが示された。また、スクラバーで使用した水の供給については、将来的には水を循環使用し、少量の補給水を準備することで、水の供給インフラがなくても運転が可能であることから、本目標も達成されたと評価される。

3) 専門の運転員ではなく、一般人が、簡単なトレーニングを経て安全に運転できる設備であることの実証。

上述の100時間連続のフィールド試験は、研究員1名、技術員1名、大学院生2名の4名が、2交代で設備の運転にあたり、無事運転を終えることができた。その成果に基づき、一般人でも簡単なトレーニングで設備を運転できるように、「安定的システム運用のための運転操作手順書」と、「3日間トレーニングプログラム」を作成した。以上より、本目標も達成されたと評価される。

4) 使用する補助燃料は他の装備（例えば車両や重機）でも必要とされるものであり、その消費量が最小限であることの実証。

研究開始当初は、ガスエンジン発電機（ガス化ガスの単焼）及び混焼エンジン発電機（軽油とガス化ガスの混焼）の2種類のエンジン発電機の導入を予定しており、補助燃料としては、混焼エンジン用の軽油を想定していた。しかし、導入した30kWのガスエンジン発電機で、ガス化ガスの単焼で所定の性能が得られたことから、混焼エンジン発電機の導入は取りやめた。その結果として、補助燃料としては、設備を起動する電力を供給するためのガスエンジン発電機駆動用のプロパンガスと、ガスエンジンでの燃焼が開始されるまでのガス化ガスの燃焼用のプロパンガスのみとなり、このいずれのプロパンガスについても、設備が定常運転に入った時点で不要となることから、補助燃料としては、プロパンガスボンベ1本を準備しておけば十分であることが明らかとなった。以上より、本目標も達成されたと評価される。

5) 本研究で試作する設備で所要電力を上回る発電出力が得られることの実証。

設備の所要電力が12kWであるのに対して、平成29年度の研究成果として、木質炭化物のブリケットで25kW、ペレットで26kW、ブリケット/ペレット混合燃料で23kWの発電出力が得られており、本目標も達成されたと評価される。

6) 本研究終了時まで、100時間以上の連続発電の実証。

平成29年度に実施したフィールド試験において、夜間の騒音の問題から、エンジン発電機の駆動は昼間のみであったが、ガス化炉については夜間も運転を継続し、100時間

の連続運転を達成した。したがって、本目標も達成されたと評価される。

7) 処理を要する廃棄物を発生させないことの実証。

本設備で発生する残渣は、ガス化炉から排出される炭化物と、炭化炉の燃焼室から排出される灰分のみである。ガス化炉から排出された炭化物は、炭化炉の燃焼室で燃料として活用したことから、最終的な残渣は、炭化炉の燃焼室から排出される少量の灰分のみであった。原料として用いた有機資源が、天然の木質か、厨房ゴミであったことから、特段の有害物質が含まれているとは考えられず、その結果、これら有機資源の無機成分である灰分も特段の処理は不要と判断される。したがって、本目標も達成されたと評価される。

8) 有害な排ガスや排水の発生によって、周辺環境に悪影響を及ぼさないことの実証。

本設備からは排水は発生しないことから、排ガスのみが環境規制の対象となりうる。本設備で発生する排ガスは、炭化炉の燃焼室から発生する排ガスとエンジン発電機からの排ガスがあるが、フィールド試験実施前に、小諸市及び長野県に相談した結果、本設備は規模が小さいことから、炭化炉及びガスエンジン発電機共に、大気汚染防止法の規制対象となるばい煙発生施設には該当しないとの回答があった。そのため、大気汚染防止法で規制されている硫黄酸化物、ばいじん、窒素酸化物、その他有害物質（カドミウム及びその化合物、塩素、塩化水素、弗素・弗化水素及び弗化珪素、鉛及びその化合物）について、計測専門業者による正式な測定は実施しなかった。しかし、窒素酸化物については、当研究室に計測器があったことから、両排ガス中の窒素酸化物の濃度測定を行った。その結果、炭化炉からの排ガスについては最大で 70ppm、エンジン発電機からの排ガスについては最大で 180ppm であった。参考のため、大気汚染防止法で定める窒素酸化物の規制値は、廃棄物焼却炉で 250～700ppm、ガス機関で 600ppm であることから、本設備から排出される排ガス中の窒素酸化物濃度は、十分に低いことがわかる。以上より、本目標も達成されたと評価される。

1. 2 研究課題終了後の将来性

これまで、世界各国で、小型のバイオマスガス化発電設備が種々開発され、実用化されてきたが、そのほとんどすべてが乾燥木質を対象とするものであった。それに対して、本研究課題で実証した設備は、生ゴミを含む多様な有機資源からの発電を可能とする技術であり、小型のバイオマスガス化発電設備としては、前例のないものである。

そこで、本研究成果を受けて、未来技術研究所株式会社が、環境省の「二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金（途上国向け低炭素技術イノベーション創出事業）」に対して提案した、「ベトナムにおける高効率廃棄物発電と低炭素運搬技術を組み合わせたゼロエミッション循環型社会インフラシステムの実証」という平成 29-30 年度の 2 ヶ年にわたるプロジェクトが採択となった。本プロジェクトの基本構想は、電気自動車で生ゴミの収集・運搬を行い、集めた生ゴミを炭化・ペレット化してガス化発電を行い、その発電出力で電気自動車のバッテリーの充電を行うというもので、同社としては早期の実用化をめざしている。同様なプロセスは、特に発展途上国や、先進国の離島などの小規模自治体に広く適用可能であり、当初目標とした被災地での小規模な発電に留まらず、民生分野で、世界中に広く普及していく可能性を秘めている。

本研究成果を生ゴミからの発電に適用する場合、炭化処理に先立つ乾燥処理をどのように安価にまた効率的に行うかということが最大の技術的な課題となる。本研究では、生ゴミに対しては、炭化炉を用いて予備乾燥を行ったが、十分な乾燥が行えず、その結果として、良好な炭化物の収率が低いという問題があった。上記のベトナムでの実証プロジェクトでは、簡易な温室内での天日乾燥を予定しており、天日で果たして十分な乾燥が行えるかどうか、プロジェクトの成否を左右する大きな鍵となる。

1. 3 副次的成果や目標を超える成果

「要素研究」については、当初、オイルスクラバーでどこまでタール除去効率の向上が可能か予測がつかなかったために、具体的な数値目標は掲げなかったが、結果的に重質タール、中・軽質タール共に、100%の除去効率を達成することができ、また、植物油の効果的な再生法を実証することもできて、物理的なタール除去法としては、世界最高レベルの研究成果となった。

また、「ガス化・発電システム研究」では、上述のように、本研究開始時には想定していなかった、含水率の極めて高い生ゴミの炭化・ペレット化に成功したことが、環境省のプロジェクトへと本研究の成果が展開されるきっかけとなり、本研究で開発した技術が、単に被災地への適用に留まらず、広く世界中の民生分野に普及する可能性が開かれた。

一方で、これまで報告例が全くない、1~2g/Nm³程度の微量のタールを含有する生成ガスであっても、50 時間程度の運転でタールの各機器への堆積の問題が顕在化することが、ガス化炉の 100 時間の連続運転を行うことで初めて明らかとなった。さらに、炭化物ペレット成型時に加えるバインダーが、ペレットのガス化時のタール生成の増加を招くことも初めてわかり、今後、より長時間設備を安定的に運転するための方策・課題を明確化することができた。これは、短時間の設備の運転ではわからない、今後の研究開発の指針となる大きな成果であると言える。

1. 4 論文、特許、学会発表等の研究の成果

本研究成果は、Applied Energy 誌 (Impact Factor=7.182) に 2 編、Fuel 誌 (Impact Factor=4.601) に 2 編、Energy & Fuels 誌 (Impact Factor=3.091) に 1 編と、合計 5 編の学術論文として、著名な英文誌に掲載されている。

また、ポスドク研究員として雇用した Lu Ding 氏は、在任期間中に 3 本の学術論文を公表し、別の仕事に移った現在も、本研究成果に基づく学術論文を執筆中であり、本研究プロジェクトは、若手の研究者の育成に大きく貢献した。

さらに、本研究の成果として、別紙 3 に記載のように、特許を 1 件出願した。

1. 5 研究実施体制とマネジメント

本研究は、基礎研究という位置づけでありながら、実運用可能な規模の設備の長時間連続運転の実証をめざした研究であり、安全に設備を運転しながら、必要なデータを取得していくための研究実施体制の構築とマネジメントが極めて重要であった。そのため、研究を実施する研究員 1 名、設備を安全に運転する技術員 1 名、研究者や研究補助者と英語でコミュニケーションを取りながら、物品の購入や管理を担当する技術員 1 名の合計 3 名の本研究専従者を雇用し、研究補助者として大学院生を雇用して研究を実施する体制を構築した。研究代表者との密なコミュニケーションを図りながら、要素研究は大

大学院生が中心となって実施し、システム化研究は上記の専従の研究者と技術員を大学院生が補佐する体制で研究を進めた結果、特段の事故の発生なしに研究目標を達成することができ、同時に、通常の大学の研究では経験できない、規模の大きな研究を若手研究者に経験させることができた。

1. 6 経費の効率的執行

経費の執行にあたっては、学内の規則を遵守することはもちろんのこと、本ファンディング独自の規則も遵守するよう、物品の購入や管理を担当する上記の専従の技術員が、本学の経理担当事務方と密に連絡を取り、適宜指導を受けながら経費を執行した結果、平成 28 年度分までの経費執行については、防衛装備庁側からは特段の指摘を受けていない。特に本研究は、入札手続きを要する大型物品の購入が多数あり、学内の調達規則に従いながら、円滑に研究を進めていく上で、研究代表者が各年度、早めに調達担当事務方に調達手続きについて相談するよう心がけたことが、研究目標のほぼ完全な達成につながったと考えている。

2. 平成 29 年度（報告年度）の実施内容

2.1 実施計画

要素研究

① 高性能オイルスクラバーの開発

平成 28 年度までの研究成果より、植物油を用いたオイルスクラバーがタール除去に有効であることが確認された。そこで平成 29 年度は、マイクロバブリング技術と植物油の再生技術をオイルスクラバーに組み合わせ、10時間の連続実験を実施し、99%以上の重質タールが除去されることを確認する。タール除去性能確認後、このオイルスクラバーを④の総合発電試験のシステムに組み込む。

② 炭化物の炭化度が破砕性とペレット強度に与える影響の解明

平成 28 年度までの研究成果より、炭化物の炭化温度が低い方が炭化物の破砕性やペレット強度は低下するが、ガス化効率は向上することが明らかとなった。

平成 29 年度は、温度条件を 300、350、400、450℃として炭化物を作成する。作成した炭化物の破砕性を測定し、破砕性が高く破砕装置の電力消費量が低くなる炭化温度を確認する。さらに、作成した炭化物からペレットを製造する。製造したペレットについて、強度を引張圧縮試験機により測定し、圧縮強度が 2kg 以上となる炭化温度を確認する。

これらの結果をもとに、破砕性、ペレット強度、ガス化効率が高くなる最適な炭化温度を選定し、選定した炭化温度で④の総合発電試験のペレット製造を実施する。

③ ブリケットの密度とガス化特性の関係の解明

ブリケット製造時に炭化物の圧縮回数を変えることで、異なる密度のブリケットを製造する。圧縮回数は、12回、15回、17回の 3 種類とし、ブリケットに用いる炭化物は同一のものとする。製造したブリケットの密度は、引張圧縮試

験機で測定する。製造したブリケットを用いてガス化実験を行い、ガス発熱量や炭素転換効率を測定し、ガス化反応性が高いブリケットの密度を明確化する。この結果をもとに、④の総合発電試験では、ガス化効率の高い密度のブリケットを製造する。

ガス化・発電システム研究

④ 総合発電試験

樹木粉碎機を用いて様々な種類の木質試料を粗破碎し、炭化処理を行い、炭化物を作成する。次に、成型機用粗破碎機を用いて炭化物を破碎し、バインダーを加えてブリケット及びペレットを製造する。そして、作成されたブリケット及びペレットにより、ガス化・発電の総合試験を本学内で実施する。

総合発電試験では、ブリケット、ペレット、ブリケット/ペレット混合燃料のガス化性能を比較し、ガス化に適した燃料形状、混合比率を明らかにする。

また、様々な種類の木質試料から20kW以上の発電出力が得られ、試験で発生するタールが、エンジンの障害にならないことを確認する。

この総合発電試験より、3. 委託業務の目的と成果目標の1, 5, 7, 8を達成したことを以下の事項から確認する。

1については、総合発電試験に含水率50%以下の様々な種類の木質試料を使用すること、5については、総合発電試験で20kW以上の発電出力を得ることで、装置の所要電力15kW以上を達成する。7, 8については、残渣物、排ガスを分析し、環境への影響が少ないことを確認する。なお、排水は本システムでは発生しない。

また、4については、この総合試験で使用する補助燃料の消費量が最小となる運転方法を確認し、この運転方法を⑤のフィールド試験に適用する。

⑤ フィールド実証試験

④の総合発電試験から得られた成果をもとに、最適な燃料を用いてフィールド試験を実施する。フィールド試験は、常盤館（長野県小諸市）にて実施する。

このフィールド試験より、3. 委託業務の目的と成果目標の2, 3, 4, 6を達成したことを以下の事項から確認する。2は、電力等のない野外でフィールド試験を実施すること、3については、専門の運転員ではない人がトレーニング後に本システムを運転することにより確認する。4については、④で確認した運転方法を適用すること、6については、フィールド試験で100時間の連続運転を実証することで確認する。

⑥ プロジェクトの総合的推進

本委託業務で得られた研究成果を、5th World Bioenergy Congress and Expo（スペイン、マドリッド）、アリカンテ大学における合同セミナー（スペイン、アリカンテ）、The 9th International Conference on Applied Energy（英国、カーディフ市）、環境・エネルギーに関する日中韓合同シンポジウム（中国、大連市）で発表することを予定している。また研究成果を学術論文として積極的に公表する。

2.3 研究成果の説明

以下の業務項目を業務計画書に基づき実施した。

要素研究

① 高性能オイルスクラバーの開発

平成 28 年度までの研究で、オイルスクラバーによるガス化ガス中のタール除去について、以下のことが明らかとなった。

1) 植物油によるバブリングスクラバーを用いた吸収がタール除去に有効であるが、吸収したタールや微粒子の蓄積により、植物油のタール吸収能力は徐々に低下する。

2) そこで、遠心分離や濾過といった分離手段によって、定期的に植物油中から蓄積したタールや微粒子を除去し、植物油を再生することによって、特に植物油の重質タール除去性能を回復させることができる。

3) 植物油を用いたスクラビングによるタール除去効率の向上に、ベンチュリスクラバーを用いたマイクロバブルの生成が有効であり、7.5%の水を混ぜてエマルジョン化させた植物油のマイクロバブリングによって、100%の重・中質タール、軽質タール（エンジン内で固化の恐れのあるナフタレン及びフェノール）の除去が実証された。

そこで、平成 29 年度は、当初は、上記の 2) と 3) の成果を組み合わせ、植物油の再生を行いながら、マクロバブリングによって 10 時間連続の高効率タール除去の実証を計画していたが、その後の実験によって、遠心分離や濾過では、植物油中に残留する中・軽質タールの除去が困難であり、植物油の再生を繰り返すと、徐々にタール除去性能が低下していくことが明らかとなった。そこで、タールを吸収した植物油中からの中・軽質タールの除去に研究の焦点を当てることとした。

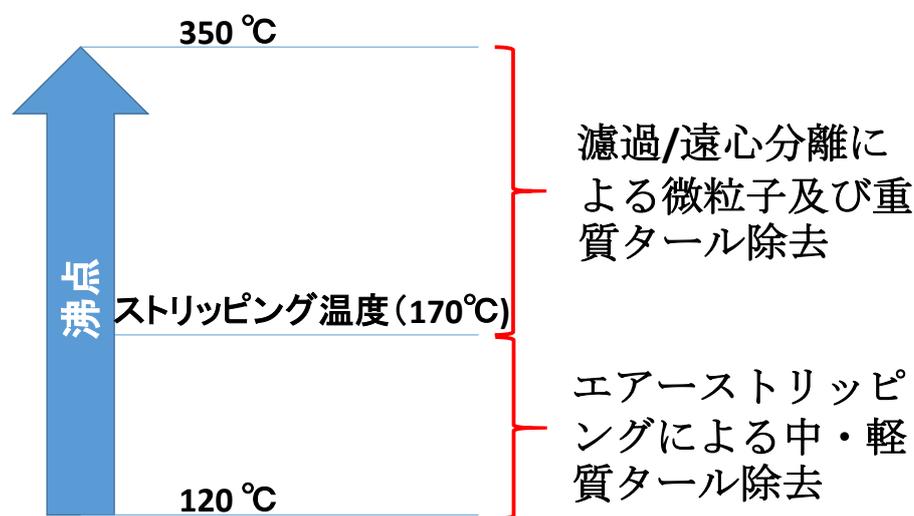
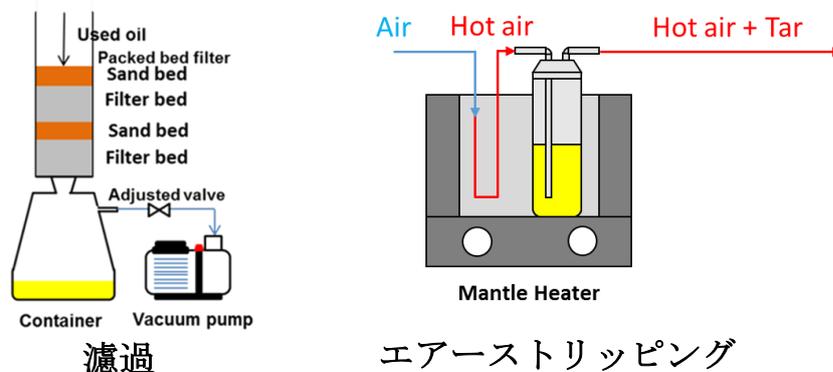


図 1 濾過/遠心分離とエアーストリッピングを組み合わせた植物油中からの微粒子・タール分除去

本研究の基本的なアイデアを図 1 に示す。濾過/遠心分離による植物油の再生は、微粒子や高沸点の重質タールには有効であるが、沸点の低い中・軽質タールの除去は困難である。そこで、エアーストリッピング（加熱された空気を植物油中へと導き、その加熱空気温度以下の沸点のタール分を蒸発させて空気といっしょに植物油中から抜き出

す技術)を濾過/遠心分離の後に行うことで、植物油中に残留する中・軽質タールを除去することが可能となる。最初にエアーストリッピングの実験を行い、最適な加熱空気温度として170℃を選定した。



濾過

目的：微粒子と高沸点重質タールの除去

エアーストリッピング

目的：低沸点中・軽質タールの除去

図2 濾過とエアーストリッピングを組み合わせたタール除去実験装置

図2には、濾過とエアーストリッピングを組み合わせた植物油からのタール除去実験装置を示す。タール分を含有する植物油は最初に濾過を行って、微粒子と重質タールを除去し、次に空気を170℃まで加熱してエアーストリッピングを行い、低沸点の中・軽質タールの除去を試みた。

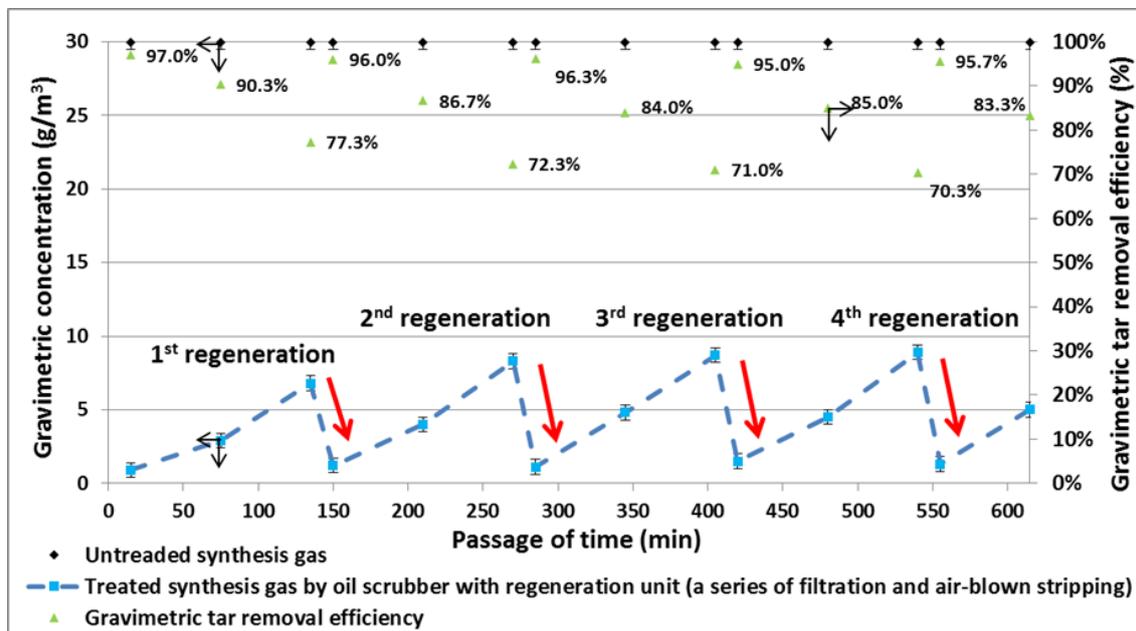


図3 マイクロバブリングと濾過/エアーストリッピングによる植物油の再生を組み合わせた10時間のタール除去実験結果(中・重質タール)

図3には、熱分解基礎実験装置で杉を熱分解させ、発生したタールを含有する熱分解ガスをカノラ油中にマイクロバブリング方式で導き、135分ごとにタールを含有するカノラ油を、濾過とエアーストリッピングの組み合わせによって再生させ、再度熱分解ガ

スを導いて、タール除去時間が 10 時間に達するまで実験を継続した時の、カノラ油スクラバーの入口と出口の中・重質タール濃度の経時変化を示す。新品のカノラ油では 97.0%の中・重質タールが除去されていたのが、135 分を経て 77.3%にまで中・重質タール除去率が低下しているが、カノラ油の再生後は、ほぼ新品のカノラ油と同じレベルまで中・重質タール除去率が回復している様子がわかる。以降、カノラ油の再生を行うたびに、同じような挙動が繰返されており、中・重質タールの長時間除去に、マイクロバブリングと濾過/エアーストリッピングによるカノラ油の再生の組み合わせが有効であることが示された。

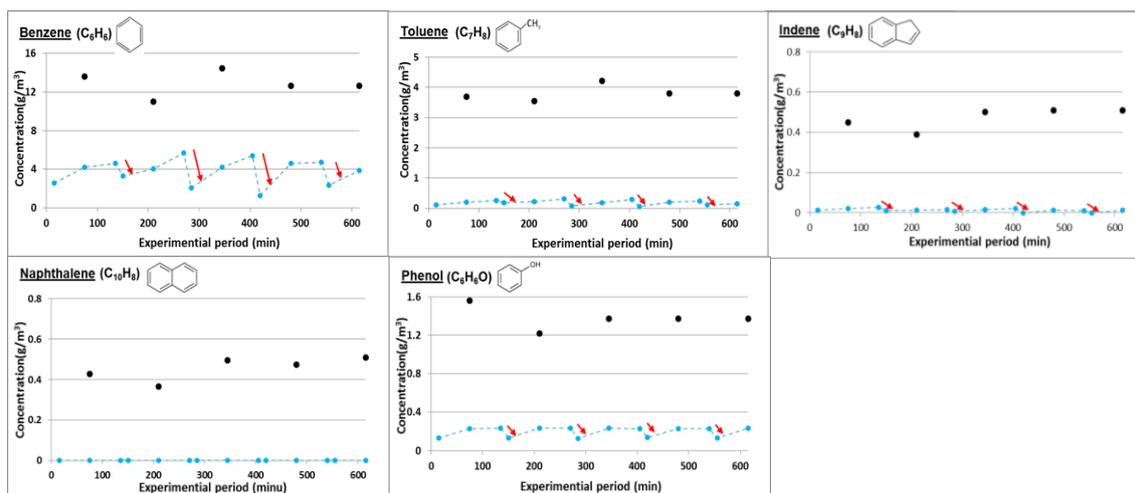


図4 マイクロバブリングと濾過/エアーストリッピングによる植物油の再生を組み合わせた 10 時間のタール除去実験結果（軽質タール）

次に図 4 には、上記の 10 時間のタール除去実験時の、主要な軽質タール成分のカノラ油スクラバー入口と出口の濃度の経時変化を示す。どの成分についても、エアーストリッピングによってカノラ油の除去性能が回復しており、軽質タールの長時間除去にも、マイクロバブリングと濾過/エアーストリッピングによるカノラ油の再生の組み合わせが有効であることが示された。

なお、当初はこれらの研究成果を実機に組み込んで、総合発電試験を実施する予定であったが、マイクロバブリングを行うためには、スクラバー前後で相当な圧力差が必要であることがわかり、実機に必要な圧力差を得るようにする（すなわち誘引ブロワーをパワーアップする）と、所要動力の増加を招くことになり、100 時間の連続運転では、オイルスクラバーに充填している植物油の定期的な交換でタール除去性能の維持が可能であることから、マイクロバブリングと植物油の再生のプロセスを実機に組み込むことは取りやめた。

② 炭化物の炭化度が破砕性とペレット強度に与える影響の解明

平成 28 年度の研究成果として、「炭化温度を 300℃に抑えることによって、500℃で炭化する場合に比べて、炭素転換率、冷ガス効率共に大幅な向上が可能であることがわかり、これら両効率を上げるためには、炭化温度の最適化が必要であることが示された。」と結論されている。一方で、炭化温度を下げる（すなわち炭化度を下げる）と、炭化物の破砕性が低下し、ペレットの強度も低下することがわかっている。そこで、平成 29 年

度は、基礎実験用の炭化炉で、炭化温度を 300℃、400℃、500℃と変化させて、得られる炭化物の破碎性とその炭化物を成型させて得られるペレットの強度の比較を行った。なお、当初は、300℃、350℃、400℃、450℃の 4 種類の温度で炭化させる予定であったが、実機の炭化炉でそこまで細かに温度設定することが困難であり、炭化室内に温度分布もあることが明らかとなったことから、上記の 3 種類の温度で炭化させ、最適な炭化温度を探索することとした。

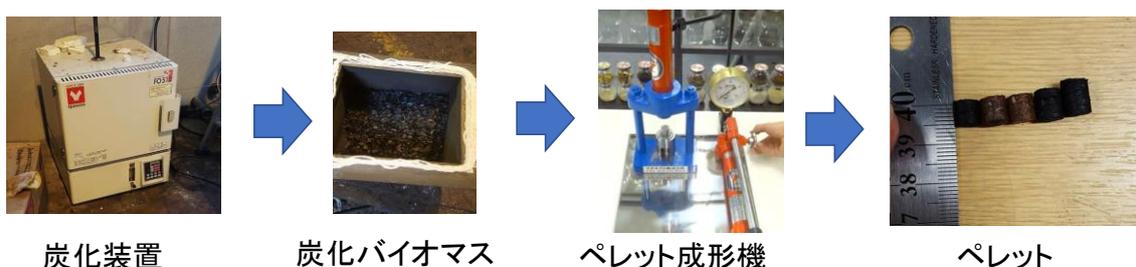


図 5 炭化・ペレット化の実験の流れ

図 5 に、今回の炭化・ペレット化の実験の流れを示す。最初に杉の木材チップを炭化装置により炭化し、炭化バイオマスを製造した。炭化条件は、目的温度まで 5 度/分で昇温した後、60 分間維持した。その後、炭化バイオマスを粉砕機で粉体とし、炭化物の粉体をポパール及び水と混ぜ、ペレット成形機によってペレットを製造した。重量比は、炭化物粉体：ポパール：水 = 10:1:3.6 であった。

表 2.1 炭化温度と破碎性指数及びペレット強度の関係

炭化温度	300℃	400℃	500℃
破碎性指数 (HGI)*	23.2	65.0	70.1
ペレット強度 kg/mm	1.4	2.0	1.9

生成された炭化バイオマスの破碎性は、ハードグローブ粉砕装置を用いて測定し、成型したペレットの強度は、引張圧縮試験機を用いて測定した。その結果を表 2.1 に示す。ここで、HGI 値は、低いほど粉砕しにくいことを示す。表 2.1 より、400℃以上で炭化を行うことで、破碎性が大幅に向上することがわかった。破碎性が低いと破碎に必要とするエネルギー量が増大する。石炭の HGI 値が 40～60 であることから、400℃以上で炭化することにより、石炭並の破碎性を有する炭化物が得られることがわかる。一方で、上述した平成 28 年度の研究成果から、炭化温度が低いほうがガス化特性は向上することから、破碎性の観点からは、400℃が最適な炭化温度であると判断される。また、ペレット強度についても、400℃の炭化温度で最大値となることがわかり、以上より、最適な炭化温度は 400℃であると結論される。そこで、実機の炭化装置においても、炭化温度は 400℃に設定して、総合発電試験及びフィールド試験用の炭化物ペレットの製造を行った。

③ ブリケットの密度とガス化特性の関係の解明

ブリケットの圧縮成型回数を増加させると強度は増加するものの作業効率は悪くな

り、また、ガス化特性にも影響を及ぼす可能性がある。後述する総合発電試験の結果、ブリケットやブリケットとペレットの混合燃料よりも、ペレット単体のほうがガス化に適していることが明らかとなったことから、本研究は、ブリケットではなく、平成 29 年度に購入したペレット成型機を用いて製造したペレットを対象として行うこととした。ペレット成型機の特徴から、ペレット成型回数は、1 回、2 回、3 回の 3 種類とし、ペレットの密度、強度、ガス化性能を測定することで、最適なペレット成型回数を検証した。成型したペレットの強度は、引張圧縮試験機を用いて測定した。

表 2.2 ペレット成型回数と製造されたペレットの密度・強度の関係

ペレット成型回数	1回	2回	3回
密度 g/cm ³	0.68	0.93	1.00
強度 kg/mm	3.0	4.6	4.7

表 2.2 には、ペレット成型回数を変えた時に、製造されたペレットの密度と強度がどのように変化するかを示す。この表から、1 回の成型で製造されたペレットの強度は、ガス化炉への投入の衝撃に耐えうるものであるが、2 回成型を行うことで、ペレットの密度と強度共に、大きく上昇することがわかった。

表 2.3 ペレット成型回数とガス化性能の関係

ペレット成型回数	1回	2回	3回
ガス化残渣量 g	2.92	3.18	3.28
炭素転換率 %	31.1	25.3	24.6
生成ガス量 L	11.57	11.36	11.31
LHVピーク MJ/Nm ³	6.4	6.0	6.1

そこで、ガス化性能の観点から、最適な成型回数を検証するために、ガス化基礎実験装置を用いて、3 種類の成型回数の異なるペレット 5g をそれぞれガス化炉に投入し、30 分間で 800 度へと昇温した後、45 分間温度を維持した。ガス化剤として空気を 0.12L/min で系に流し、マイクロ GC により、ガス組成を 10 分おきに測定した。その結果を表 2.3 に示す。ペレット成型回数の増加に伴い、炭素転換率と生成ガス量が減少していることから、ペレットの反応性は低下したことがわかる。炭素転換率や生成ガス量、ガス発熱量を比較すると、密度が大幅に増加する 2 回目のペレット成型で大きく低下することがわかった。以上から、1 回のペレット成型が最適であると結論された。しかし、総合発電試験において、1 回の成型を行ったペレットを用いた場合、ガス化の過程でペレットが崩れ、ダストの発生量が増加することが明らかとなったことから、フィールド試験用には、2 回の成型を行ったペレットを使用することとした。

ガス化・発電システム研究

④ 総合発電試験

平成 29 年度に調達した樹木粉碎機を用いて、表 2.4 に示す比率で各種木質が混合されている試料（含水率 13%）を粗破碎し、その炭化処理を行い、炭化物を作成した。次に、成型機用粗破碎機を用いて炭化物を破碎し、バインダーを加えて平成 27 年度に調達したブリケット成型機を用いてブリケット燃料をまた、平成 29 年度に調達したペレット成型機を用いてペレット燃料を製造した。また、比較のために杉（含水率 10%）からも同様にして炭化物のブリケット燃料を製造した。

表 2.4 各種木質の混合比率

木質の種別	混合比率
糸杉	10%
松	60%
杉	25%
ツガ、ベニヤ、栗	5%

表 2.5 杉と混合木質およびそれらの炭化物の成型燃料の分析結果

試料	工業分析（重量%）			元素分析（重量%）				低位発熱量 /MJ·kg ⁻¹	化学組成
	揮発分	固定炭素	灰分	C	H	N	O		
杉	72.95	26.83	0.21	36.02	4.41	0.10	59.18	18.8	CH _{1.469} O _{1.232} N _{0.002}
杉の炭化物ブリケット	27.13	70.37	2.50	82.81	2.74	0.35	11.51	34.3	CH _{0.397} O _{0.104} N _{0.004}
混合木質	77.65	15.26	7.09	47.40	5.69	0.15	42.56	19.9	CH _{1.441} O _{0.673} N _{0.003}
混合木質の炭化物ペレット	36.76	61.93	1.31	79.05	3.70	0.27	16.59	32.7	CH _{0.437} O _{0.157} N _{0.003}
混合木質の炭化物ブリケット	30.22	67.43	2.35	81.81	2.58	0.38	12.87	31.1	CH _{0.379} O _{0.118} N _{0.004}

表 2.5 には、杉と混合木質およびそれらの炭化物の成型燃料の分析結果を示す。杉と混合木質の炭素含有量を比べると、前者が 36.02%、後者が 47.40%とかなりの違いが見られるが、炭化物ブリケットの炭素含有量は、前者が 82.81%、後者が 81.81%とほぼ同程度の値となっており、木質燃料の種類にはよらずに、炭化物成型燃料は、ほぼ同様な性状を示していることがわかる。

そこで、混合木質の炭化物ペレット、炭化物ブリケットならびにそれらの等量の混合燃料について、総合発電試験を実施した。

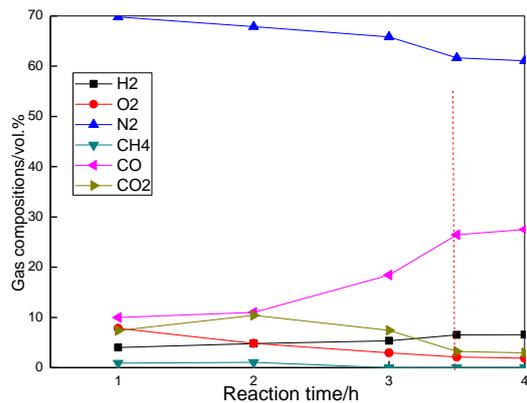


図 6 炭化物ブリケットを使用したガス化時の生成ガスの組成の経時変化

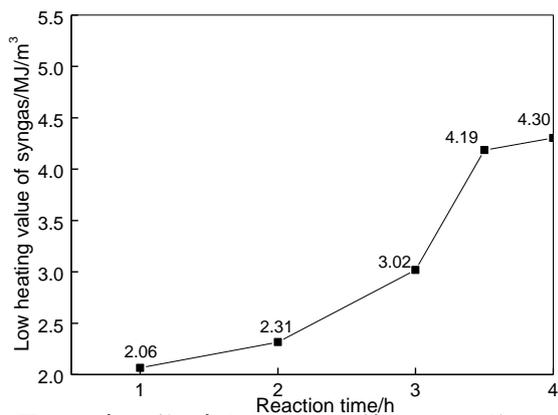


図 7 炭化物ブリケットを使用したガス化時の生成ガスの低位発熱量の経時変化

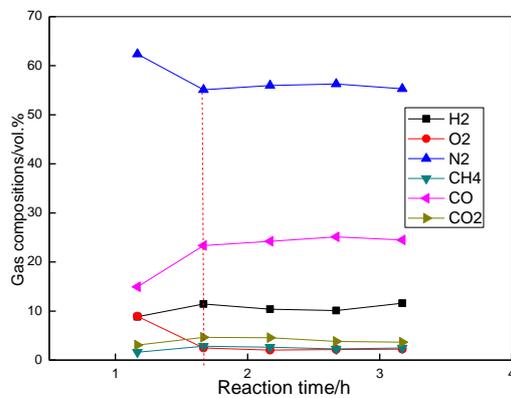


図 8 炭化物ペレットを使用したガス化時の生成ガスの組成の経時変化

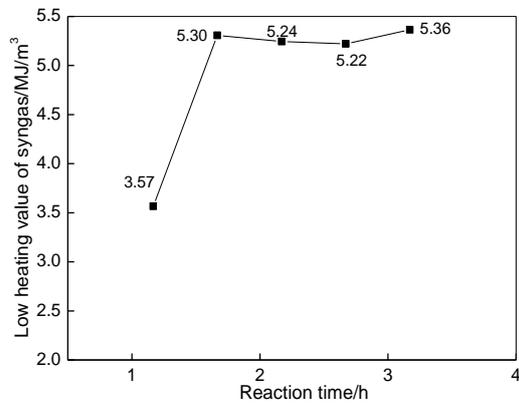


図 9 炭化物ペレットを使用したガス化時の生成ガスの低位発熱量の経時変化

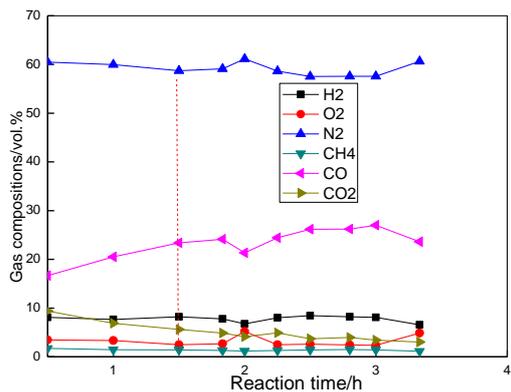


図 10 炭化物ブリケット/ペレット混合燃料を使用したガス化時の生成ガスの組成の経時変化

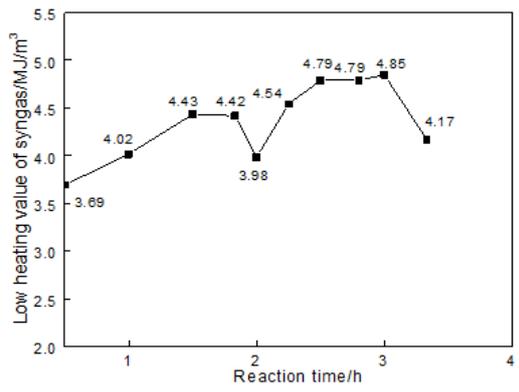


図 11 炭化物ブリケット/ペレット混合燃料を使用したガス化時の生成ガスの低位発熱量の経時変化

図 6、7 には、炭化物ブリケットを使用してガス化を行った際の生成ガスの組成と低位発熱量の経時変化を、図 8、9 には、炭化物ペレットを使用してガス化を行った際の生成ガスの組成と低位発熱量の経時変化を、また図 10、11 には、炭化物ブリケット/ペ

レット混合燃料を使用してガス化を行った際の生成ガスの組成と低位発熱量の経時変化をそれぞれ示す。これらの図から、炭化物ペレット単体でガス化を行った場合が、最も早く定常状態に達し、低位発熱量も最も高くなることがわかる。これは、ブリケットに比べてペレットのほうが粒径が小さく、比表面積が大きいため、ガス化反応がより促進されるためであると考えられる。

またエンジン発電機の発電出力及び発電効率の最大値とその時のガス化炉に供給した空気流量は表 2.6 に示す通りとなり、発電出力と発電効率共に、炭化物ペレット単体でガス化を行った場合に最も大きな値を示すことが明らかとなった。

以上より、炭化物ペレット単体がガス化に最も適していると結論され、フィールド試験においては、炭化物ペレット単体を燃料として使用することとした。

また、当初本設備の総消費電力量は 15kW と見込んでいたが、運転結果に基づいて見直しを行った結果、12kW で済むことが明らかとなり、これを大幅に上回る発電出力が実証された。この段階では、タールによるエンジン発電機の障害は見られなかった。また、成果目標の 1, 5, 7, 8 の達成状況については、上記 1.1 で詳述したとおりである。

表 2.6 各種燃料のガス化発電時の最大出力と最大発電効率

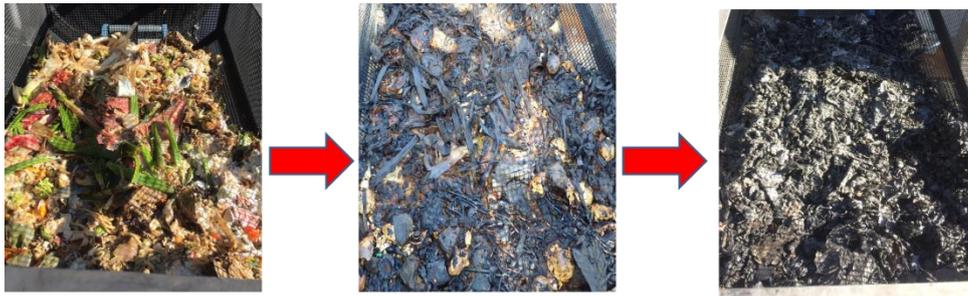
	ブリケット	ペレット	ブリケット/ペレット混合燃料
ガス化炉供給空気流量	80Nm ³ /h	70Nm ³ /h	60Nm ³ /h
最大発電出力	25kW	26kW	23kW
最大発電効率	25.5%	27.8%	27.6%

さらに、成果目標の 4 については、本設備では、補助燃料としてプロパンガスが必要となる。その用途としては、エンジン発電機の起動用及び、ガス化ガス精製・燃焼装置で生成ガスを燃焼させる際の助燃用を想定していた。しかし、実際は、エンジン発電機は、プロパンガスを使用しなくても起動が可能であることがわかり、エンジン発電機に供給する生成ガス量をなるべく多くし、ガス化ガス精製・燃焼装置に送る生成ガス量を最小限に抑えることで、助燃用のプロパンガスの使用量を抑制する運転法も確立させた。この運転法は、後述するフィールド試験にも適用した。

⑤ フィールド実証試験

1) 生ゴミの炭化・ペレット化試験結果

本設備の常盤館でのフィールド試験実施にあたって、所管の長野県及び小諸市と事前相談した結果、木質に加えて、常盤館の厨房から発生する生ゴミの炭化実験も行えることとなった。そこで、100 時間連続運転用のペレット製造時に、含水率 50%程度以下の多様な有機資源の利用という成果目標を上回る成果を狙って、含水率 71%の生ゴミの炭化・ペレット化にも挑戦した。生ゴミの場合は、含水率が極めて高いため、最初に、炭化炉に収めた生ゴミを 250℃まで加熱し、1 時間その温度を保持して乾燥させた。そして、生ゴミの入ったサンプルキャリアを一旦炭化炉から取り出し、十分に混合させた後に、再度、炭化炉に投入し、475℃まで加熱して、1 時間保持し、炭化を行った。生ゴミの変化の様子を図 12 に示す。



(a) 生ゴミ (b) 乾燥後の生ゴミ (c) 炭化後の生ゴミ

図 12 生ゴミの乾燥・炭化の様子

一方、比較のために行った木質の炭化においては、炭化室の温度を直接 475℃まで上げ、1 時間保持した。表 2.7 には、木質と生ゴミの炭化の物質収支を比較して示すが、本実験で用いた炭化炉では、生ゴミの粘着性が高く、熱の伝わりが悪いことから、均一に加熱することができず、その結果として、炭化物の収率は低かった。ただ、表 2.2、表 2.3 に示したように、予備乾燥を行うことで、生ゴミからでも木質と同等レベルの炭化物ペレットを製造することができることが実証された。

表 2.7 木質と生ゴミの炭化試験の物質収支

投入した木質の総量	77.4 kg
生の木質の含水率	7.3 重量%
木質炭化物の生成量	24.2 kg
木質炭化物の収率 (木質炭化物の生成量/投入した木質の総量)	31.3 重量%
投入した生ゴミの総量	77.1 kg
生ゴミの含水率	71.0 重量%
絶乾ベースの投入した生ゴミの総量	22.4 kg
乾燥後の生ゴミの総量	53.9 kg
乾燥後の生ゴミの含水率	62.3 重量%
生ゴミ炭化物の生成量	1.6 kg
未炭化/半炭化の生ゴミの総量	27.2 kg
未炭化/半炭化の生ゴミの含水率	45.1 重量%
未炭化/半炭化の生ゴミを除いた生ゴミ炭化物の収率 (生ゴミ炭化物の生成量/(絶乾ベースの投入した生ゴミの総量-未炭化/半炭化の生ゴミの総量×(1-未炭化/半炭化の生ゴミの含水率))×(1-生ゴミの含水率))	6.2 重量%

2) 100 時間連続運転

常盤館において、約 1 ヶ月半をかけて、アカシアの乾燥時から必要量のペレットを製造し、最終目標である 100 時間連続のガス化発電試験に挑戦した。ただし、騒音防止のため、常盤館からの要請により、夜間の 12 時間 (20:00-8:00) は、エンジン発電機は停止させ、ガス化炉のみ連続運転した。

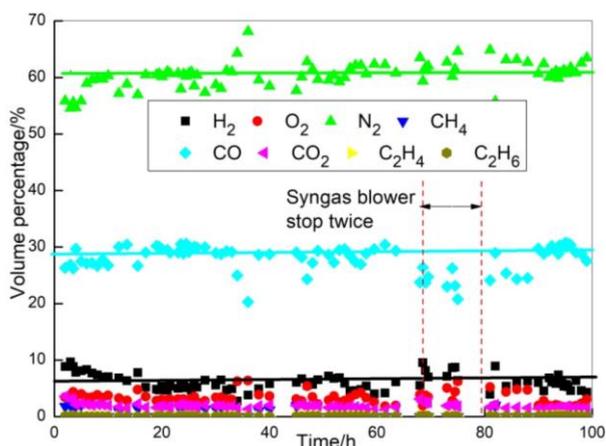


図 13 100 時間連続運転時の生成ガス組成の経時変化

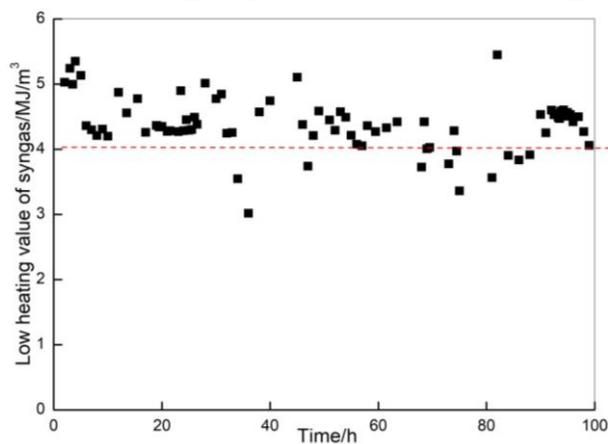


図 14 100 時間連続運転時の生成ガス発熱量の経時変化

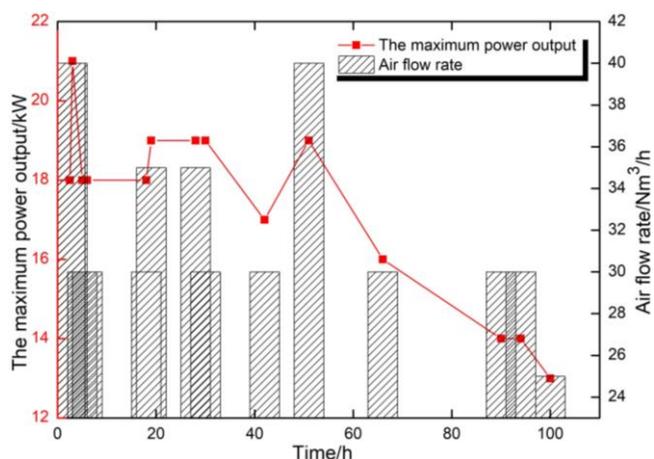


図 15 100 時間連続運転時のエンジン発電機出力の経時変化

図 13 には、100 時間連続運転時の生成ガス組成の経時変化を示す。タールによる閉塞のため、70 時間～80 時間の間に、2 度ほど、エンジン発電機手前に設置した誘引ブロワーが停止したが、ブロワーの清掃後、ガス化炉の運転が回復し、ほぼ安定したガス生成ができていることがわかる。また、図 14 には、100 時間連続運転時の生成ガスの低位発熱量の経時変化を示すが、ほぼ目標とする $4\text{MJ}/\text{Nm}^3$ を越える発熱量が安定的に得られていることがわかる。一方、エンジン発電機の出力の経時変化を図 15 に示すが、ペレットの消費量を抑えるために、ガス化炉に供給する空気流量を $40\text{Nm}^3/\text{h}$ に抑え、 20kW の発電出力で運転を開始したが、50 時間を越えたあたりから、系内の圧力損失が増大し、結果的にガス化炉に供給する空気量を $40\text{Nm}^3/\text{h}$ に維持することができなくなり、発電出力も 14kW 程度まで徐々に低下していった。

そこで、圧力損失の増大の原因を探るために、ガス化炉下流の各機器での圧力損失の経時変化を図 16 に示した。この図から、冷却器以外の機器の圧力損失が、50 時間を越えたあたりから、タール分の堆積によって、徐々に上昇していることがわかる。

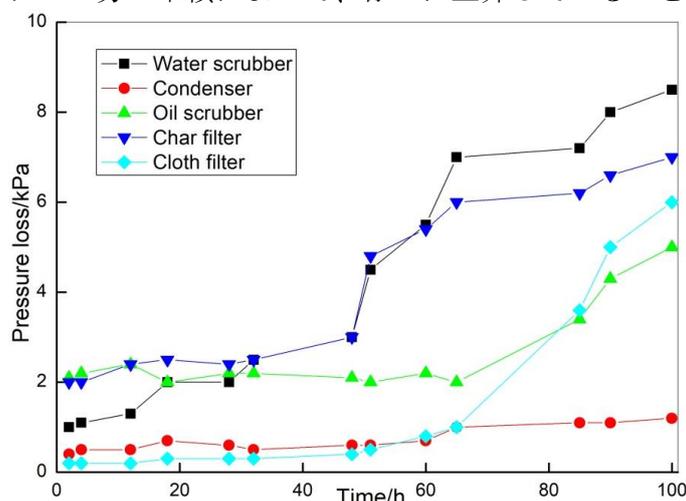


図 16 ガス化炉下流の各機器での圧力損失の経時変化

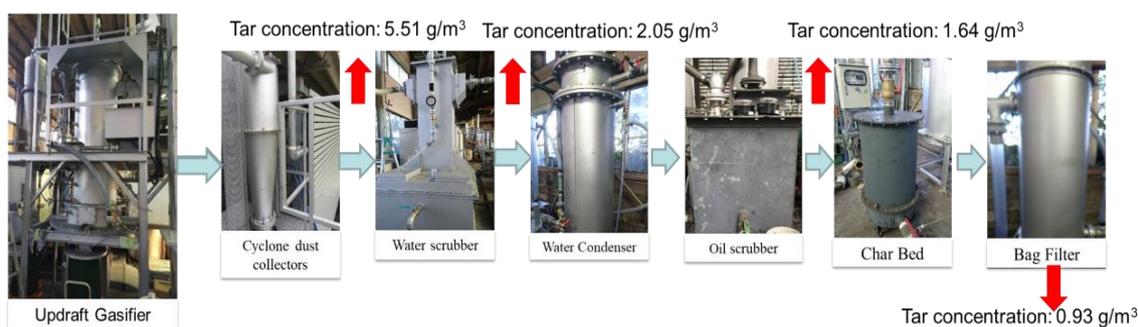


図 17 タール除去用の各機器出口における生成ガス中のタール濃度 (50 時間経過時)

そこで、50 時間経過時のタール除去用の各機器出口における生成ガス中のタール濃度を図 17 に示す。サイクロン集塵器の出口でのタール濃度が $5.5\text{g}/\text{Nm}^3$ であったのが、バグフィルター出口では $1\text{g}/\text{Nm}^3$ 以下までタール濃度が低減されていたにもかかわらず、50 時間以降、各機器内でのタールの堆積による圧力損失の増大が顕在化し、70 時間経過後に、誘引ブロワーのタール閉塞による停止というトラブルが発生している。これは、

100 時間連続運転を行って初めて明らかとなった問題であった。今後、より長時間の連続運転を可能とするためには、以下の対策が必要となる。

- 各機器の間の配管にバイパスを設け、圧力損失が増大した時に、ガス化炉を運転しながら、それぞれの機器の清掃が行えるようにする。
- 要素研究の成果を取り込んで、オイルスクラバーのタール除去効率の一層の向上を図る。
- ガス化炉出口のタール濃度を下げる。

この最後の方策にかかわる問題として、炭化物のペレット化の際に用いるバインダーがタール発生の原因となっている可能性が疑われた。バインダーがタール発生に及ぼす影響を調べるために、表 2.8 に示す作成法（作成法①がフィールド試験で採用した混合比率）で製造した 3 種類のペレットと、木質炭化物の 4 種類の試料について、ガス化基礎実験装置で 800°C で熱分解ガス化し、生成ガス中のタール濃度を計測した。その結果を表 2.9 に示す。この表より、木質炭化物にバインダーを加えることでタール濃度が増加することがわかり、今後、必要なペレット強度を維持しながら、タール生成を抑制できるバインダーの探索が重要であることが明らかとなった。例えば、表 2.9 より、コーンスターチ溶液は、良好なバインダーになりうることをわかる。また、タール濃度低減をめざした炭化条件の最適化も必要となる。

表 2.8 タール発生量の比較のための各種ペレット作成法

ペレット作成法	バインダー溶液濃度（重量%）	重量比率
①木質炭化物: ポバール: バイオオイル: 水	-	10:0.5:1.0:4.0
②木質炭化物: ポバール: 水	-	10:0.7:4.5
③木質炭化物: コーンスターチ溶液	9.1%	10:4.5

表 2.9 各種炭化物試料の熱分解ガス化時の生成ガス中のタール濃度

	タール濃度 (g/Nm ³)
木質炭化物	1.12
ペレット作成法①	2.60
ペレット作成法②	2.04
ペレット作成法③	1.36

成果目標の 2, 3, 4, 6 の達成状況については、上記 1.1 で詳述したとおりである。

⑥ プロジェクトの総合的推進

本委託業務で得られた研究成果が 4 編の学術論文として、著名な英文誌に公表された。また国際会議で 5 件、国内会議で 2 件の研究成果の発表を行った。

3. 成果の外部への発表及び活動

学術論文

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 （学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外 の別
Improvement of the biomass tar removal capacity of scrubbing oil regenerated by mechanical solid-liquid separation	Thanyawan Tarnpradab, Siriwat Unyaphan, Fumitake Takahashi and Kunio Yoshikawa	Energy & Fuels	2017年2月3日	国外
Improvement of tar removal performance of oil scrubber by producing syngas microbubbles	Siriwat Unyaphan, Thanyawan Tarnpradab, Fumitake Takahashi and Kunio Yoshikawa	Applied Energy	2017年8月11日	国外
Development of an ultra-small biomass gasification and power generation system: Part 1. A novel carbonization process and optimization of pelletization of carbonized wood char	Lu Ding, Kunio Yoshikawa, Minoru Fukuhara, Dai Xin, Li Muhan	Fuel	2017年9月8日	国外
Development of an ultra-small biomass gasification and power generation system: Part 2. Gasification characteristics of carbonized pellets/briquettes in a pilot-scale updraft fixed bed gasifier	Lu Ding, Kunio Yoshikawa, Minoru Fukuhara, Yuto Kowata, Shunsuke Nakamura, Dai Xin, Li Muhan	Fuel	2018年1月22日	国外
Assessment of the Carbonized Woody Briquette Gasification in an Updraft Fixed Bed Gasifier Using the Euler-Euler model	Ding Lu, Kunio Yoshikawa, Tamer M. Ismail, M. Abd El-Salam	Applied Energy	2018年3月23日	国外

学会発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
バイオマス炭化物のガス化特性に関する研究、口頭発表	梅田暁恵、中村駿介、吉川邦夫	日本エネルギー学会第25回年次大会	2016年8月9-10日	国内
An investigation of low cost and effective tar removal techniques by venturi scrubber producing syngas microbubbles and absorbent regeneration for biomass gasification、口頭発表	Siriwat Unyaphan, Thanyawan Tarnpradab, Fumitake Takahashi and Kunio Yoshikawa	The 8th International Conference on Applied Energy（北京、中国）	2016年10月8-11日	国外
The Characteristic of Char Gasification、ポスター発表	Kyoe Umeda, Shunsuke Nakamura and Kunio Yoshikawa	2016 Japan-Korea-China Joint Symposium on Energy and Environment（熱海）	2016年10月27-29日	国内
Tar removal performance of emulsified absorbent in venturi scrubber producing syngas microbubbles、口頭発表	Siriwat Unyaphan, Thanyawan Tarnpradab, Fumitake Takahashi and Kunio Yoshikawa	2016 Japan-Korea-China Joint Symposium on Energy and Environment（熱海）	2016年10月27-29日	国内
Optimization of process factors for pelletization of wood char、口頭発表	Ding Lu, Dai Xin and Kunio Yoshikawa	2016 Japan-Korea-China Joint Symposium on Energy and Environment（熱海）	2016年10月27-29日	国内
Small-scale biomass gasification and power generation combined with carbonization/briquetting pretreatment、口頭発表	Kunio Yoshikawa	4th International Conference on Energy, Sustainability and Climate Change（サントローニ島、ギリシャ）	2017年6月12-14日	国外

Development of portable ultra-small biomass gasification and power generation system、招待講演	Kunio Yoshikawa	5th World Bioenergy Congress and Expo (マドリード、スペイン)	2017年6月29-30日	国外
Development of portable ultra-small biomass gasification and power generation system、招待講演	Kunio Yoshikawa	アリカンテ大学における合同セミナー(アリカンテ、スペイン)	2017年7月3日	国外
炭化度の異なる炭化木質バイオマスガス化の特性評価、口頭発表	中村駿介、吉川邦夫	日本エネルギー学会第26回年次大会	2017年8月1-2日	国内
Development of a Novel Ultra-small Biomass Gasification and Power Generation System、口頭発表	Lu Ding, Minoru Fukuhara, Kunio Yoshikawa, Dai Xin, Li Muhan	The 8th International Conference on Applied Energy (カーディフ、英国)	2017年8月21-24日	国外
A novel distributed power generation system based on gasification of carbonized wood briquette/pellet、口頭発表	Lu Ding, Kunio Yoshikawa, Minoru Fukuhara, Dai Xin, Li Muhan	China-Japan-Korea joint symposium 2017 (大連、中国)	2017年10月28日	国外
Development of a portable ultra-small biomass gasification and power generation system、口頭発表	Xin Dai, Kunio Yoshikawa, Lu Ding, Yoto Kowata, Minoru Fukuhara	5th Asian Conference on Biomass Science (仙台)	2018年1月16日	国内

ガス化発電設備見学会

1. 浙江工業大学一行(東京工業大学、2017年8月3日)
2. ベトナム政府関係者一行(東京工業大学、2017年9月14日)
3. 環境省プロジェクト関係者一行(常盤館、2017年11月28日)
3. 小諸市商工会議所一行(常盤館、2017年11月29日)

知的財産権の申請状況

別紙3のとおり

4. まとめ、今後の予定

4. 1 まとめ

本研究は、大学内で行う基礎研究である「要素研究」と、実用規模の設備でフィールドにおいて長時間の連続運転をめざした「システム化研究」あるいは「ガス化・発電システム研究」の2本の大きな柱の下で実施した。

[要素研究]

まず、「要素研究」については、主要な研究課題は、1) ガス化生成ガス中のタールの高効率除去法の開発、2) 木質の炭化が破碎性、成型性ならびにガス化特性に及ぼす影響の解明と最適な炭化条件の明確化にあった。

1) ガス化生成ガス中のタールの高効率除去法の開発

本研究提案時まで得られていた知見に基づき、中・重質タールはオイルスクラバーで、軽質タールは炭化物フィルターで除去するという、ガス精製設備としては、オイルスクラバーと炭化物フィルターの両機器を直列に配置したプロセスを想定し、両機器のタール除去性能向上のための方策を検討した。

まず、植物油を用いたオイルスクラバーについては、タール除去効率の向上と、タール吸収済みの植物油の再生による植物油の使用可能時間の増大という二つの研究課題に挑戦した。タール除去効率の向上については、ベンチュリスクラバーを用いて、生成ガスのマイクロバブリングを行うことによる中・重質タール除去効率の向上効果を調べた。その結果、微小気泡の生成による吸収表面積係数の増加により、タール除去効率は顕著に向上し、カノラ油のみの場合で最大 97.7%の中・重質タール除去効率を、7.5%の水を混ぜてエマルジョン化したカノラ油の場合で最大 100%の中・重質タール除去効率が達成された。また、軽質タールについては、下流機器に悪影響を及ぼす恐れのあるフェノールとナフタレンが、マイクロバブリングを組み込んだオイルスクラバーで 100%除去可能であることが明らかにされた。物理的なタール除去法のみで、100%のタール除去を実現した研究結果はこれまで報告されておらず、画期的な研究成果であると言える。しかし、ガス精製を続け、カノラ油中にタールや微粒子が蓄積してくると、数時間程度でタール除去効率が顕著に低下することから、濾過/遠心分離による使用済みカノラ油からのタールや微粒子の除去を試み、重質タールについては、この再生プロセスの組み込みにより、タール除去性能が復活し、カノラ油を長時間使用できるようになることを明らかにした。そして、濾過/遠心分離に引き続いて、エアーストリッピングを行うことによって、カノラ油から中・軽質タールも除去可能であることが示され、スクラビングを行っている植物油の一部を常時抜き出して、上記の再生を行った後にオイルスクラバーに戻すことによって、植物油の使用時間を大幅に増加させることができることを初めて明らかにした。これらは、バイオマスガス化で最大の技術的課題となっているタールの高効率除去に関わる技術の進展に大きく貢献する画期的な研究成果であると言える。

一方、炭化物フィルターについては、上記の研究によるオイルスクラバーのタール除去効率向上に伴い、軽質タールの高効率除去も可能となったことから、本来の軽質タールの除去という役割は不要となったが、重質タールの最終的な除去に効果があることが明らかにされた。

2) 木質の炭化が破碎性、成型性ならびにガス化特性に及ぼす影響の解明と最適な炭化条件の明確化

炭化物のガス化については、これまであまり報告例がなく、研究開始時には、破碎性、成型性ならびにガス化特性の観点から、どの程度まで炭化を進めればいいのか判断がつかなかった。そこで、炭化温度を変えることによって、炭化度を変化させ、炭化度が破碎性、成型性ならびにガス化特性に及ぼす影響を解明する基礎実験を行った。その結果、400℃以上で炭化を行うことで、破碎性が大幅に向上し、ペレット強度についても、400℃の炭化温度で最大値となることがわかったが、一方で、炭化温度が低いほうがガス化特性は向上することも明らかとなった。その結果、400℃が最適な炭化温度であることが決定でき、この成果は、「ガス化・発電システム研究」に反映されることとなった。

[システム化研究] [ガス化・発電システム研究]

本研究では、システムとして設備全体の100時間連続運転の実証をめざして、順番に調達した個々の機器の最適な運転条件の明確化から初めて、一步一步、着実に研究を進めた結果、1) 野外に存在する様々な形状や含水率50%程度以下の多様な有機物に適用可能な設備であることの実証、2) 電力や水、燃料の供給インフラが整備されていない野外で適用可能な自立した設備であることの実証、3) 専門の運転員ではなく、一般人が、簡単なトレーニングを経て安全に運転できる設備であることの実証、4) 使用する補助燃料は他の装備（例えば車両や重機）でも必要とされるものであり、その消費量が最小限であることの実証、5) 本研究で試作する設備で所要電力を上回る発電出力が得られることの実証、6) 本研究終了時まで、100時間以上の連続発電の実証、7) 処理を要する廃棄物を発生させないことの実証、8) 有害な排ガスや排水の発生によって、周辺環境に悪影響を及ぼさないことの実証という、研究開始時に掲げた8項目の成果目標をすべて達成することができた。

4. 2 今後の予定

本研究開始時には想定していなかった、含水率の極めて高い生ゴミの炭化・ペレット化に成功したことが、環境省の「二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金（途上国向け低炭素技術イノベーション創出事業）」の下での、「ベトナムにおける高効率廃棄物発電と低炭素運搬技術を組み合わせたゼロエミッション循環型社会インフラシステムの実証」という平成29-30年度の2カ年にわたるプロジェクトへと本研究の成果が展開されるきっかけとなり、本研究で開発した技術が、単に被災地への適用に留まらず、広く世界中の民生分野に普及する可能性が開かれた。

また、これまで報告例が全くない、1~2g/Nm³程度の微量のタールを含有する生成ガスであっても、50時間程度の運転でタールの各機器への堆積が問題となることが、ガス化炉の100時間の連続運転を行うことで初めて明らかとなった。さらに、炭化物ペレット成型時に加えるバインダーが、ペレットのガス化時のタール生成の増加を招くことも初めてわかり、今後、より長時間設備を安定的に運転するための方策・課題として、1)各機器の間の配管にバイパスを設け、圧力損失が増大した時に、ガス化炉を運転しながら、それぞれの機器の清掃が行えるようにする、2)要素研究の成果を取り込んで、オイルスクラバーのタール除去効率の一層の向上を図る、3)炭化条件、ペレット成型条件を最適化することによりガス化炉出口のタール濃度を下げる、を明確化することができた。これは、短時間の設備の運転ではわからない、今後の研究開発の指針となる大きな成果であると言え、平成30年度は、タール生成を抑制しながら、適切な強度の炭化物ペレットが製造できるバインダーの探索を継続研究として行っていく予定である。