

終 了 報 告 書

S I P (戦略的イノベーション創造プログラム)

課題名「エネルギーキャリア」

研究開発テーマ名

「CO₂フリー水素利用アンモニア製造・貯蔵・輸送関連技術の開発」

研究題目「石炭火力へのアンモニア混焼とバイオマス混焼の比較調査」

研究開発期間：平成30年7月1日～平成31年3月31日

研究担当者：村上 一幸

所属研究機関：一般財団法人 石炭エネルギーセンター

目次

1. 本研究の目的.....	1
2. 研究開発目標とマイルストーン.....	1
3. 研究実施内容.....	1
3-1. バイオマス混焼の実例調査.....	1
3-1-1. 国内大手火力発電所のバイオマス混焼現況.....	1
3-1-2. 国内におけるバイオマス混焼開発状況.....	2
3-2. アンモニア混焼の実証調査.....	9
3-2-1. アンモニア製造方法.....	9
3-2-2. アンモニア混焼試験現況.....	10
3-3. バイオマス混焼とアンモニア混焼の比較検討.....	12
3-3-1. 制度面、供給面、技術面、CO ₂ 削減面、経済面から見た比較検討.....	12
3-3-2. LCA (Life Cycle Assessment) 検討範囲.....	13
3-3-3. LCA (Life Cycle Assessment) 評価.....	15
3-3-4. 総合評価結果.....	17
3-4. 日本における将来のアンモニア混焼導入可能性評価.....	18
3-4-1. アンモニア混焼導入可能な既設発電プラント総容量と総アンモニア使用量.....	18
3-4-2. アンモニア混焼既設発電プラントの潜在的なCO ₂ 削減総量.....	18
3-5. まとめ.....	18
3-5-1. アンモニア混焼の優位性.....	18
3-5-2. 課題及び結論.....	18
3-6. 今後の課題.....	19
4. 外部発表実績.....	19
(1) 論文発表.....	19
(2) 学会、展示会等発表.....	19
(3) プレス発表.....	20
(4) マスメディア等取材による公表.....	20
5. 特許出願実績.....	20
6. 参考文献.....	20

図表目次

表 1	燃料性状.....	4
表 2	バイオマスペレット燃料の性状例と特徴.....	6
表 3	LCA 範囲.....	13
表 4	LCA 検討緒言.....	15
表 5	LCA 評価結果.....	16
表 6	調査結果要約.....	17
図 1	国内電力会社の木質バイオマス混焼状況（主要地点）.....	2
図 2	日本の大手電力会社で使用しているバイオマス燃料等混焼状況.....	2
図 3	木質ペレットミル利用の混焼設備.....	3
図 4	新日鐵住金釜石火力発電所（岩手県釜石市）.....	4
図 5	バイオマス混焼ボイラ概要.....	5
図 6	専用粉砕方式を使用した混焼適用例.....	5
図 7	天然ガスを原料とするアンモニア製造工程.....	9
図 8	バイオマス混焼プロセス(カロリー比で 20%混焼).....	14
図 9	アンモニア混焼プロセス(カロリー比で 20%混焼).....	14
図 10	石炭混焼する際の CO ₂ 排出量当りの燃料コスト(CIF)比較.....	16

1. 本研究の目的

CO₂フリー水素からのアンモニア製造・利用が商業的に成立するためには、CO₂フリー水素製造、アンモニアへの転換、輸送、消費地での発電という一連のサプライチェーンでの技術的・経済的な優位性が求められる。こうした優位性の検討のためには、サプライチェーンを構成する各ステップにおけるコストおよびエネルギー効率の評価を通じて最終的な発電単価を評価し、これを他のCO₂フリーな発電技術と比較することが必要である。

現在、石炭火力発電の低炭素化を推進する技術として、高効率化(IGFC)やCCSが挙げられるが、初期投資が大きく社会実装までにはまだ時間を要する。一方、石炭火力発電へのバイオマス混焼やアンモニア混焼は比較的初期投資が少なく、即効性のある低炭素化技術である。バイオマス混焼はすでに商用化が進んでいるが、アンモニア混焼は実証段階にあり、社会的受容性の明確化を踏まえて、早期商用化が期待されている。

本研究では、既存の石炭火力でのバイオマス混焼の実例調査、アンモニア混焼の実証段階における調査を行い、アンモニア混焼とバイオマス混焼の比較検討を行うことを目的とする。

2. 研究開発目標とマイルストーン

既設石炭火力発電所を対象として、バイオマス混焼、アンモニア混焼の両混焼システムのモデルや前提条件を設定し、発電効率、CO₂排出原単位及びコストインパクト、将来の導入増大に向けた供給可能性、LCAの検討結果の評価等について定量的、定性的に比較検討し、アンモニア混焼の優位性や課題を明確化する。

3. 研究実施内容

3-1. バイオマス混焼の実例調査

3-1-1. 国内大手火力発電所のバイオマス混焼現況

図1に示す主要な電力会社が石炭火力発電プラントに利用しているバイオマス混焼用の燃料は一般的に木質チップ・ペレットであり(図2)、量的には発電出力のカロリー比で3%程度以内である。今後、この比率はバイオマス専用ミルの採用或は半炭化(トレファクション)技術(特に比較的低温での半炭化技術)の採用により、次第に高まることが予想される。

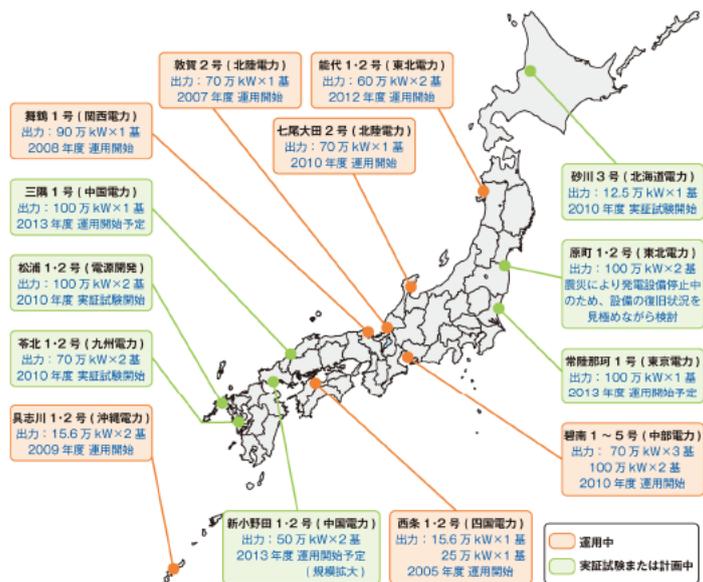


図 1 国内電力会社の木質バイオマス混焼状況 (主要地点)

出典: [NEDO 再生可能エネルギー技術白書・第2版]

木質ペレット	<ul style="list-style-type: none"> 木質原料を事前に、異物除去、粉碎、乾燥、圧縮成型した燃料 		東京 (常陸那珂)	7万 t (主に海外)
	<ul style="list-style-type: none"> メリット : 発熱量が高い 輸送性、貯蔵性が良い デメリット : 粉塵対策が必要 価格が高い 		関西 (舞鶴)	6万 t (海外)
木質チップ	<ul style="list-style-type: none"> 木質原料を粗粉碎した燃料 		沖繩 (具志川)	2万 t
	<ul style="list-style-type: none"> メリット : 屋外貯蔵が可能 価格が安い デメリット : 水分が多く、発熱量が低い 水分量や形状など、チップの性状にばらつき 		相馬共火	14万 t (主に海外)
汚泥炭化	<ul style="list-style-type: none"> 下水処理場から発生する汚泥を利用。 炭化温度により、発熱量などの特性が異なる。 		常磐共火	9万 t (主に海外)
	北海道 (砂川)		(試験中)	
	東北 (能代、原町)		9万 t	
	中部 (碧南)		30万 t (海外)	
	北陸 (敦賀、七尾大田)		3-4万 t	
中国 (新小野田、三隅)	4-6.5万 t			
四国 (西条)	1.5万 t			
九州 (苅北)	1.5万 t			
電発 (松浦)	2.5万 t			
酒田共火	0.3万 t			
常磐共火	1万 t			
中部 (碧南)	0.3万 t			
電発 (松浦、竹原)	0.5万 t			

図 2 日本の大手電力会社が使用しているバイオマス燃料等混焼状況

出典: [東京電力]

3-1-2. 国内におけるバイオマス混焼開発状況

国内でのバイオマス混焼比率を高めるための大型石炭火力発電所に適用した場合の開発状況 (試験状況・結果) は下記の通り。

【電力中央研究所】

(出典: [炭化バイオマスの石炭混焼利用: 2016年3月7日])

環境省地球環境局 CO₂ 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証試験「石炭火力における混焼率 30% を実現する木質バイオマスの改質プロセスの実用化開発」にて電力中央研究所が実施して、得られた結論は以下の通り。

- ・木質バイオマスは微粉炭より粒径が大きくても燃焼性は良好
- ・木質バイオマスはN分含有率が低いので石炭混焼時の NO_x 濃度は低減
- ・木質バイオマスの粉碎性の改善には炭化処理が有効
- ・炭化した木質バイオマスをさらにペレット成形するとより粉碎性は改善

【IHI】

「微粉炭火力の木質バイオマス高比率混焼技術の開発」

(木質バイオマスを粉碎して高比率で微粉炭と炉内混焼するための新開発の木質バイオマスミルと専焼バーナの試験結果についての報告) (出典： [IHI技報VOL52 No.4 2012])

石炭用のミルをそのまま木質バイオマス粉碎に適用した場合は、粉碎容量が石炭の場合の1/10 まで減少するが、ミル胴内流速の増大とエアポートの改造によって、石炭を超える粉碎容量を得ることができる。その結果、1.5~3.0%/min の変化率での安定した負荷変化も実現できた。ミル改造内容は、容易に元の石炭用ミルに戻すことが可能なものであり、新設に加え既設設備の改造にも対応可能である。一方、バーナは木質バイオマスと石炭をそれぞれ専焼させるバーナとして、安定燃焼を得た。今回、木質ペレット (サイズ：数mmオーダの木粉を押し固めたもの) を対象に50 cal%混焼の見通しを得ることができた。

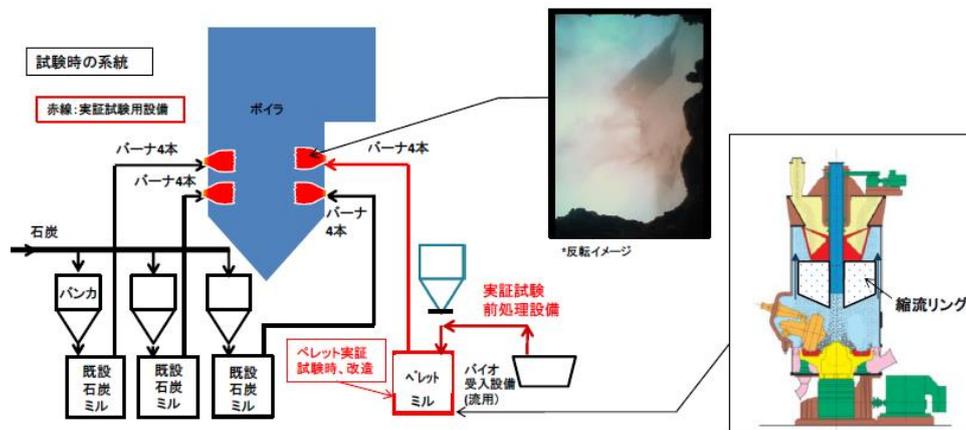


図 3 木質ペレットミル利用の混焼設備
(新日鐵住金釜石火力発電所にて実証試験)

出典： [IHI 技報 VOL52 No.4 2012]

「CCT ワークショップ 2016-木質バイオマスの混焼率向上に向けて/IHI 2016.07.19」

新日鐵住金株式会社釜石火力発電所にて「2015 年 11 月に 150MW 級の商用機において、バイオマス 25% (入熱ベース) の実証試験を実施し、想定通りの性能結果を達成した。石炭ミル 1 台に“縮流リング”と呼ばれる機器を取り付けたペレットミルに改造し、粉碎したペレットを石炭バーナで燃焼した。微粉度は 1mm ふるい通過割合で 80%以上である。ボイラ収熱特性は石炭専焼時とほぼ変わらない。NO_x,

SO_x, 煤塵などの排出濃度は、バイオマス混焼割合に応じて減少した。ただし、ペレットミルの入り口温度を下げる必要があることから、ボイラ効率は相対値で0.3~0.4%下がっている」との報告あり。



項目	仕様
蒸発量	470 t/h
主蒸気圧力	17.01 MPa
主蒸気/再熱蒸気温度	569 / 540 °C
発電端出力	149 MW
ボイラメーカー	IHI
タービンメーカー	東芝

図 4 新日鐵住金釜石火力発電所（岩手県釜石市）

出典：[CCT ワークショップ：2016IHI-木質バイオマスの混焼率向上に向けて(2016.07.19)]

表 1 燃料性状

項目		単位	石炭	木質ペレット
灰組成				
酸性成分	SiO ₂	%	64.2	13.6
	Al ₂ O ₃	%	21.4	5.5
	TiO ₂	%	1.13	0.3
アルカリ成分	Fe ₂ O ₃	%	4.45	6.3
	CaO	%	1.02	44.2
	MgO	%	0.88	14.5
	Na ₂ O	%	0.58	1.6
	K ₂ O	%	1.52	8.5

出典：[CCT ワークショップ：2016IHI-木質バイオマスの混焼率向上に向けて(2016.07.19)]

【MHPS】

(出典：[三菱重工技報 Vol.54 No.3 (2017)]三菱重工技報 Vol.54 No.3 (2017))

(1) バイオマスペレット用専用粉砕方式

専用粉砕方式では、バイオマスペレット用の燃焼設備を最適化することで、従来の石炭焚きボイラ設備から大幅な機器の変更を行わず、バイオマスペレットの混焼比をより高くすることが可能となる。このバイオマスペレット用の燃焼設備としては石炭焚きで多数の運転実績がある堅型ミルと着火安定性に優れた低NO_xバーナを使用することで、高い信頼性を得ることができる。バイオマスペレット燃焼に使用する低NO_xバーナは、試験炉にてバイオマスペレット専焼での安定した燃焼を確認している。また、バイオマスペレットは揮発成分が石炭と比較して多いこと、燃料中水分が石炭と比較して少ないことからその自然着火エネルギーは石炭に比べて非常に小さい。このため、専用粉砕方式では自然発火などに対する十分な配慮が必要となる。

(2) コンベンショナルボイラでのバイオマスペレット混焼適用例

専用粉砕方式を適用したバイオマス混焼ボイラの概要を図 5に示す。

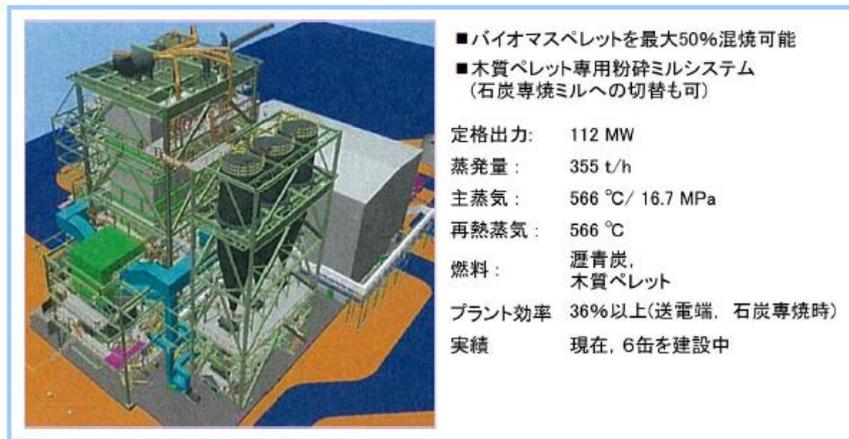


図 5 バイオマス混焼ボイラ概要

出典：[三菱重工技報 Vol.54 No.3 (2017)]

石炭焚きボイラへ専用粉碎方式によるバイオマスペレット混焼を適用する場合には、必要なバイオマス混焼率に適したバイオマスペレット専用粉碎用のミル台数を選定する必要がある。図 6はミル4台のうち2台をバイオマス専用ミルとした例であり、この場合にはバイオマス混焼比率 50%までの混焼が可能となる。

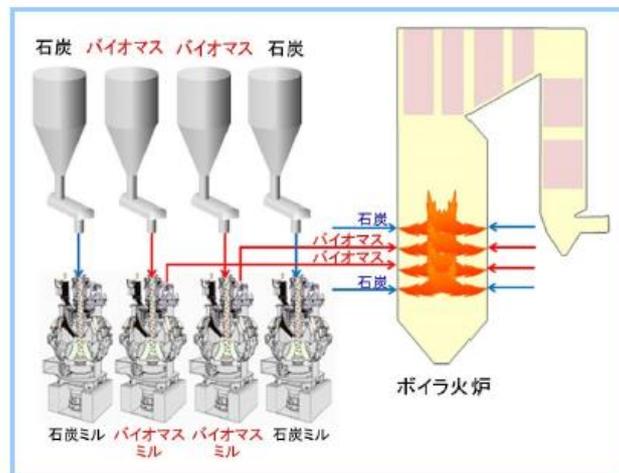


図 6 専用粉碎方式を使用した混焼適用例

出典：[三菱重工技報 Vol.54 No.3 (2017)]

既設の石炭焚きボイラからバイオマスペレット混焼への改造を行う場合には、既設の一次通風系統の設備容量を確認した上で、混焼比率のニーズに応じて改造が必要な燃焼設備台数を選定することとなる。

表 2 バイオマスペレット燃料の性状例と特徴

	石炭(漚青炭)	バイオマスペレット燃料	
		ホワイトペレット	ブラックペレット
燃料性状例			
高位発熱量	6400kcal/kg	4300kcal/kg	4800kcal/kg
全水分	9%	10%	1-5%
揮発分	31%	73%	77-85%
固定炭素	49%	14%	17-23%
灰分	11%	3%	<1%
Cl	170ppm	480ppm	10-30ppm
灰中 Na ₂ O	1%	4%	0.3-2%
灰中 K ₂ O	1%	6%	8-18%
大きさ	50mm 以下 (ミル投入時)	長さ 30mm 程度 Φ6~8mm	長さ 30mm 程度 Φ6~8mm
特徴	—	ブラックペレットに比べて脆いが、ハンドリングは比較的容易	トレファクション(半炭化)されており硬く、石炭に近いハンドリングが可能

出典：[三菱重工技報 Vol.54 No.3 (2017)]

【日立製作所】

(出典：[日立評論 2012.11/環境調和型の火力発電システム])

既設の石炭焚き火力発電所においてバイオマス混焼率を増す場合、専用のミル（粉砕機）を追加設置する必要があり、所内動力の増加や設置スペースの確保などの課題が生じる。これらに対応するため、追加設備と改造コストを抑制して高い混焼率を確保できる方式として、既設ミルを活用した燃焼システムの実用化を推進している。目標混焼率は、国内でのCO₂排出量削減目標25%に鑑み、25 cal%を設定した。この開発は「バイオマス専用粉砕方式による既設微粉炭焚きボイラでの混焼技術の実用化開発」において、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）との共同研究（2010～2013年度）において実施した。

ボイラ火炉での運用において、燃焼上の問題がないことを大型の燃焼設備を用いて実証した。バイオマスは、専焼バーナにはスイッチグラスを、混焼バーナにはスギ材を燃料として使用、石炭は豪州産バルガを使用した。専焼バーナにはシングルバーナ試験で検証した専焼バーナを、混焼バーナには石炭バーナを用い混焼比率を目標値25 cal%の前後で20 cal%から33 cal%の間で変化させて燃焼性能を評価した。専焼バーナの着火に問題はなく、安定な火炎が形成された。混焼率増加に伴ってNO_xは低下し、COの副次的生成はほぼ見られなかった。また灰中未燃分もほぼ増加しなかった。

【中部電力】

(出典：[日刊工業新聞 2017/3/1])

中部電力は 2017 年 2 月 28 日、愛知県武豊町に建設する計画の石炭火力発電所「武豊火力発電所 5 号機」（出力 107 万キロワット）に木質バイオマス燃料の燃焼設備を追加し、2022 年に稼働すると発表した。出力全体の約 17%の割合でバイオマス燃料を混焼して、石炭のみの場合と比べて二酸化炭素（CO₂）排出量を年約 90 万トン削減する。バイオマス発電の電力量は年約 12 億キロワット時と、専焼設備も含めバイオマス発電としては国内最大になる。「ブラックペレット」（加熱処理した木質ペレット）を燃料に使い、専用のバーナを付けて混焼率約 17%を実現する。ブラックペレットは海外から輸入する。

中部電力は2030年をめどに中部地域の電力需要の20%強を水力や太陽光などの再生可能エネルギーでまかなう目標。15年度時点の再生エネの比率は約14%。木質バイオマス発電所の活用で、再生エネ比率をさらに1%程度高められるとみている。

(出典：[電気新聞 2018/05/31])

中部電力は2018年5月30日、武豊火力発電所5号機の起工式を現地で開いた。石炭を燃料とする出力107万キロワットのユニットで、2022年3月の営業運転開始を見込む。工事は4月中旬から始まっており、現在は地盤改良やコンクリート打設などを行っている。式典には設備、工事、建設関係者を代表して三菱日立パワーシステムズ、大成建設等も出席した。

【国内関係者ヒアリング状況】

【A社】

2018年10月15日、A社を訪問、得られた主要情報は下記の通り。

A社はブラックペレット、トレファクションは扱っておらず、ホワイトペレットと比べた検討もしていない。オーナーの要求により対応を検討している。

【B社】

2018年10月17日、電力会社B社を訪問、得られた主要情報は下記の通り。

バイオマス混焼については、RPS制度の目標達成のため実施している。現状、海外から木質チップを輸入、ペレットは使っていない。一部汚泥燃焼含め、重量ベースで最大3%混焼。今のところ、バイオマス混焼用の設備改造は計画されていない。

【C社】

2018年10月24日、C社の石炭火力発電所(約150MW)を訪問、得られた主要情報は下記の通り。

「バイオマス混焼状況」

2010年より2%の木質バイオマスチップ(サイズ：3-5cm程度)を混焼開始し、2015年7月より重量比で10%のバイオマス混焼し、バイオマスサイズを合わせて5mm以下とした。別途カロリー比25%/重量比33%で混焼試験した時には、1台の専用ミル(コーン改造型)及び専用バーナを追加。試験後はコーンを通常型に変え、4台ミルに平均して混焼している。改造前は3台ミルで予備機なし。

混焼比が少ないこともありプラント効率には殆ど影響なし。ただし、石炭或はバイオマスの水分が多いと混焼量を調整する必要があるが、バンカーに貯蔵されている量(約8時間)が無くなるまでの時差があるので、8時間先を見越した調整が必要。

2%混焼時は、火炉内の灰付着は問題なかったが、10%になって付着量が増えた。付着緩和用として液体の薬剤(クリンカの層にもろい層を作り落とし易くする)をバンカーに散布している。また、混焼するとSOxは下がるが、NOxは上がる傾向にあり、規制値を超えない様に燃焼量を調整している。またバイオマス貯蔵サイロからの払い出し量はスクリーコンベアにて調整している。

「バイオマス燃料」

年間使用量は3万トンで、300日操業、約100t/日である。地方森林組合から木材チップを購入し、

50km 範囲から間伐材、林地残材を収集している。100 km以上では、県外へ出るので調達は難しくなる。

長さ 2~4mの長さの木材を 10 トントラックで発電所近くの貯材場まで運びチップにしている。木材の 20%程度は、枝葉利用。丸太は削り、篩にかけた後、大きいものはシュレッダーにかけて 5 mm以下にする。原木で水分が 50%程度、3 年以上乾燥させたものでも 20%以上ある。長く置けば、皮・表面は乾燥するが中は乾燥し難い。バイオマスの発熱量変動は 1%程度で問題なし。混焼率を設計 15%まで上げるために、チップをバイオマス熱量で乾燥することを考慮中である。ブラックペレットは一つの有効な対策の一つ。FIT の申請に当たっては、森林組合の方で、一般材と未利用材に分けて、納入されている。

【D 社】

2018 年 11 月 6 日、D 社を訪問、得られた主要情報は下記の通り。

「海外からバイオマスをトレファクションしたものを輸入する背景」

日本の発電所でのバイオマスの混焼率をアップしたいと考えた。現状の石炭焚発電所では混焼率は（ホワイトペレットで）4~5%までで、これ以上増やすには半炭化が必要とまず技術的な観点でスタートした。計画した当時には、メーカーがミルを改造し 5%以上焚けるとの状況が出来つつあったが、殆ど改造しなくても 10%以上混焼できる燃料タイプを考慮した。

燃料コストは FIT 付きプラントであれば問題ないコストで仕上がる予定であり、各ユーザーに「環境貢献・CO₂削減」というソリューションを提供したいと思っている。またバイオマスは、(海外の) 地元での雇用、経済協力援助の一環と認識している。

「プロジェクト概要」

周辺のゴム園からのゴムの木を利用し、ペレット化し、これを低温半炭化・トレファクションする。トレファクションしてから、ペレットにすると電気代が 20%程度安くなるとのネット情報もあるが、全体のプロセスの中では水分除去エネルギーが一番多くプロセス上はあまり変わらないと考えて、ペレット化を先にしている。ペレットにすると、ハンドリングし易く、また耐水性が増し水に浸かっても壊れにくくなる。

デモンストレーション用のトレファクションプラント（構造が簡単なキルンタイプ）、2t/h を建設予定である。現状の最大クラスのもは年間 3~4 万トンであるが、将来的には、1 基の容量が年間 10 万トン程度のもを作り需要に合わせて並べる予定である。

「認証制度」

日本の FIT は、各国それぞれの認証制度に合っていれば、問題がない。バイオマスを提供する地域毎の認証が必要で、申請時には、該当地域の認証を一括申請することになる。

「その他」

英国の DRAX 社が、2,000MW の発電所でバイオマス 100%を焚いている。カナダから年間 750 万トン輸入している。この貿易取扱量は、現在、世界の 1/3 近くになる。

3-2. アンモニア混焼の実証調査

3-2-1. アンモニア製造方法

アンモニアは、水素と空気中から分離した窒素を原料として、一般的にはハーバー・ボッシュ法を用いて製造される。水素を製造するには、水の電気分解、或は天然ガス等の炭化水素から水蒸気改質等を経て製造される。現時点で、商業的に確立されており、競争力のあるのは天然ガスからの製造である。ただし、考慮すべきことは、水素製造の改質工程においてCO₂が発生することである。このCO₂をEOR(Enhanced Oil Recovery)として利用するか、CCS(Carbon Capture and Storage)として貯蔵・固定化するのが今後の課題で、一方では再生可能エネルギー利用による、より経済的な電気分解法等での水素製造技術の開発が鋭意進められている。

本検討においては、天然ガスからアンモニア製造することとし、アンモニア製造時に排出されるCO₂をEOR或はCCSとして貯蔵・固定化することを前提としバイオマス混焼との比較検討を実施した。

【天然ガスからのアンモニアの製造工程】

図7で示すように、アンモニア製造プロセスの途中にて、CO₂が発生する。
(発生量は、3-3. 項「LCA 評価」参照)

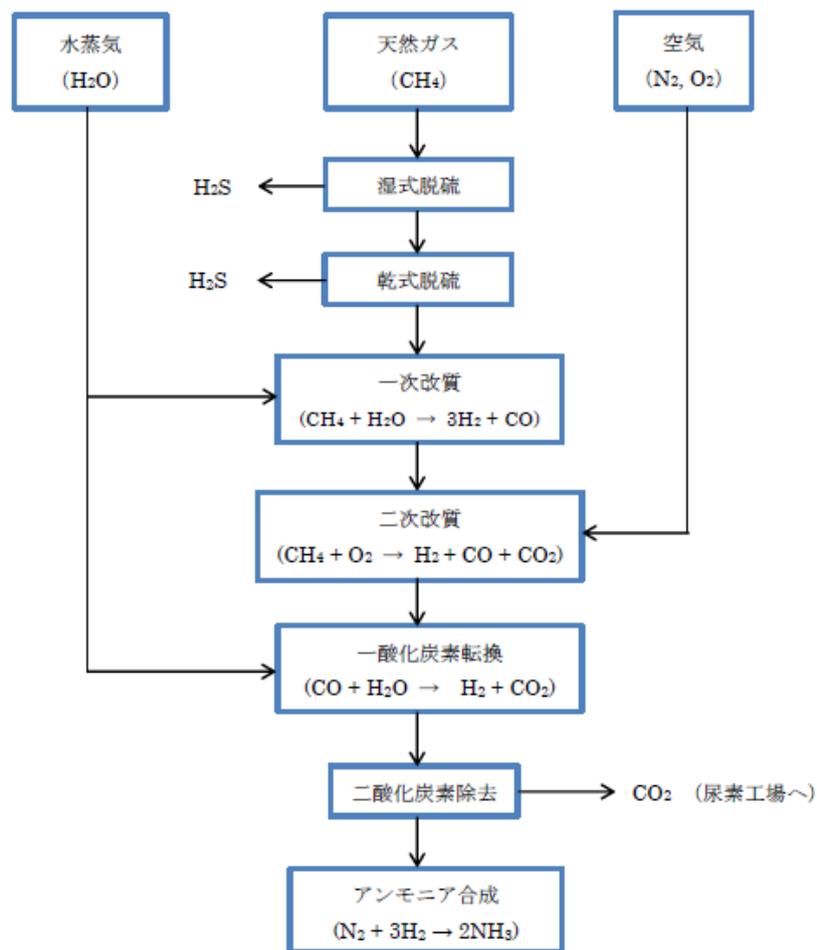


図7 天然ガスを原料とするアンモニア製造工程

出典：[BSI 生物化学研究所：肥料製造学、アンモニア]

3-2-2. アンモニア混焼試験現況

石炭とアンモニアの混焼試験は、2019年度から本格的に始まる予定で、現状、実績は乏しいが、日本のメーカーは天然ガス、水素等の燃焼実績があり、アンモニアを混焼することは大きな問題はないと思われる。

【IHI】

(ネット情報：2018.03.28/日刊工業新聞 2018.03.29)

2018年3月28日、(IHIの相生工場、兵庫県相生市)大容量燃焼試験設備(投入熱量10MW)でアンモニアを混焼させる実証実験に成功した。燃料に占めるアンモニアの比率20%は「世界最高水準」であり、2020年の実用化を目指す。アンモニアは燃焼しても二酸化炭素(CO₂)が発生しないのが特徴で、既存の石炭火力ボイラの改修で導入できる利点もある。

今回の実験でNO_xの排出濃度を従来の石炭火力の排出濃度と同程度に抑えることに成功した。実証実験は内閣府のプロジェクトとして採択されている。

相生工場の火力発電用ボイラの試験設備を改造して、アンモニアをバーナに供給する配管の形状を工夫してNO_xの排出を抑えた。

【中国電力】

(ネット情報：2017.09.12)

石炭火力発電所の「水島発電所2号機：出力15.5万kW」で、2017年7月3日～9日に、環境負荷低減のためのアンモニア混焼試験を実施した。混燃率は、約0.8% (試験時負荷：12万kW) 試験結果は、ボイラでの燃焼、窒素酸化物などによる環境影響について問題がないことが確認された。また、一定の条件下では、窒素酸化物が下がる傾向にあった。

【国内関係者ヒアリング状況】

【E社】

2018年10月15日、プラントメーカーE社を訪問、得られた主要情報は下記の通り。

工場内の燃焼試験設備で石炭とアンモニア20%の混焼試験に成功した。アンモニア20%混焼時の留意事項はNO_x発生量であり、ただ燃やすとNO_xは増加するが、燃料投入方法を工夫(高温+還元域)すれば、石炭と同等のNO_x排出レベルで対応可能である。ただし、これはE社のバーナタイプを使用したときである。

工場の試験燃焼設備容量がアンモニアの混焼率比率で20%までなので、これ以上アンモニアを燃焼した経験はない。ただし、試験負荷を下げてアンモニアの混焼率比率を30%程度まで上げた経験はある。アンモニアのカロリーの低さは、入熱を合わせることで調整可能。アンモニア混焼により粒子が少なくなるので石炭灰による輻射が減少するが、灰の付着の減少分は収熱が増えて、これとのバランスで状況が異なる。工場で、SIP関連の燃焼試験中であるが、来週10月下旬でほぼ燃焼試験を終える。来年はより詳しい灰の影響等調査の試験を継続できればと思っている。

【F 社】

2018年10月16日、電力会社F社を訪問、得られた主要情報は下記の通り。

F社は石炭火力が多いので何らかのCO₂削減対策が必要なこともあり、2017年7月にF社の発電所(約160MW)でアンモニア混焼試験を実施した。事業用発電所でアンモニアを燃焼させるのは日本初である。LNGから製造されたアンモニアは隣接する化学会社が2,000トンタンク2基を所有しており、商社からパイプラインを通してアンモニアを購入している。別途、他社からも陸送で供給されているが、これはコークスガスから製造している。

発電所での試験は、石炭バーナ16本の内、BOGバーナを配置している4本のバーナの5ノズルバーナの1ノズルで、1%(0.45t/h)の混焼試験を実施した。既設脱硝設備のアンモニア気化器を利用して実施したため、混焼率の上限が決まっている。未燃アンモニアの排出懸念があったが、問題はなかった。燃焼試験では、NO_x濃度の上昇は見られなかった。収熱特性等は、混焼量が少ないので把握できていない。

政府下のコスト検証委員会でも発電コストの大部分は燃料費が占めるとの試算が出ている。政府はアンモニア導入には積極的だが、アンモニアは、未だバリューチェーンが明確になっていないので、今後の目途はまだついていない。

【G 社】

2018年10月17日、電力会社G社を訪問、得られた主要情報は下記の通り。

石炭焚き1,000MW機を想定し、アンモニア20%混焼のFSを実施した。33,000トンのタンク、気化器、バーナ改造が主な追加設備となる。アンモニアタンクは、LNGタンクと比べ安価と想定している。気化器はシェルアンドチューブ方式を考慮している。技術的には既存技術で対応可能とみている。気化器のエネルギー投入は海水及び所内蒸気を考えている。

NO_x挙動は検討しないと分からない。灰分は石炭投入量が減るため比例して減るが、アンモニア由来の水分は増える。特に収熱挙動への影響が大きくなるので今後の検討課題である。

混焼率をアップする際に課題となる項目としてNO_x挙動、ボイラ収熱挙動などを検討しなければならないが、安いアンモニアの入手目途があることが前提である。バリューチェーンの構築を経済産業省が中心となって進めて欲しい。

【H 大学】

2018年10月24日、H大学を訪問、2018年10月19日の「シンポジウム」でのH大学教授の講演内容「アンモニア直接燃焼」を補足する形で情報を得た。得られた主要情報は下記の通り。

- ・アンモニアのLCA検討する上での公開情報
- ・電力会社発電所でのアンモニア混焼計画の概要
- ・アンモニア製造方法は、天然ガスからのハーバー・ボッシュ法が中心であるが、CO₂フリーという観点からは再生可能エネルギー利用の低価格電気利用の電気分解法は有力
- ・輸送、取り扱いを考慮するとアンモニアが水素より有利と思われる
- ・世界でのアンモニア使用量は年間1億8千万トン、製造設備に十分余裕ありと想定
- ・日本の石炭火力が全て20%混焼すると考えると、日本全体のCO₂の4%削減相当になる

3-3. バイオマス混焼とアンモニア混焼の比較検討

3-3-1. 制度面、供給面、技術面、CO₂削減面、経済面から見た比較検討

【制度面】

制度面で大事なことは、「燃料調達に当り環境破壊することなく、二酸化炭素(CO₂)排出削減に寄与できている状態をより客観的に把握できていること」であり、バイオマスについては世界的な森林認証制度が整っている。ただし、末端まで十分に認証コンセプトが浸透しているかどうかの具体的調査が、地域ごとに必要になると思われる。本レポートで、木質バイオマス調達先として検討対象としたカナダにおいても、広大な森林認証林（森林認証：PEFC, FSC）を所有している。

アンモニアの場合、本レポートにおいて一般的な天然ガスからのアンモニア製造を考慮したが、製造過程で発生する CO₂を大気に排出しているのか、CCUS として幾らか利用しているのか、或いは CCS として全量深部貯蔵しているのかの把握が必要になる。アンモニアにおいて、まだこの件に関する認証制度はないので、早期制度作りが望まれる。

【供給面】

木質バイオマスに関しては、国内供給量は FIT 下で設立される比較的小規模の発電所の地産地消が中心となり、既存の大規模発電所が必要とする多量な木質バイオマス消費に対応する供給余力はないと思われる。従って、本検討では潜在的な多量木質バイオマス燃料供給国の一つとして、カナダを候補とした。しかし、将来的には年間 30 百万トン程度の木質バイオマス消費が予想され、現実的には、輸入国の分散化或いはバイオマス混焼燃料の多様化が必要となる。

一方、アンモニアの場合、将来的には年間 11 百万トン程度が必要となるが、天然ガスからの製造であり、現状のシェール革命技術動向を考慮すると供給面での不安が少ない。

【技術面】

前項 3-1. 及び 3-2. で述べたように、バイオマス、アンモニア共に、石炭火力に 30%程度混焼することは、技術的には問題がない。今後の CO₂ 排出制限及び技術開発進捗に合わせて、混燃率も増大することが予想される。

木質バイオマスの場合、半炭化（トレファクション）し、ブラックペレットを作る製造装置が現状年間 6 万トン程度であり、大容量化が望まれる。

【CO₂削減面】

既設石炭火力プラントに、バイオマス或いはアンモニアを混燃すればするほど、石炭の消費が減り、その分 CO₂ の排出量は減る。一方、製造、輸送時等に CO₂ を排出することになる。表 3 に LCA(Life Cycle Assessment) の範囲として、CO₂ 発生検討箇所を示している。今回の検討において、アンモニア製造においては、天然ガスからの製造ということで、製造過程で発生する CO₂ は、CCS 処置することで、大気排出なしとした。

結果は次項の表 5 に示すが、既設 1,000MW-USC 石炭火力（年間負荷率 70%）に 20%バイオマス或いは 20%アンモニア混焼を実施する場合、それぞれ年間約 70 万～90 万トンの削減が可能となる。

【経済面】

経済的には、殆どがバイオマス、アンモニアの燃料代にかかっている。バイオマス利用拡大に伴い、木質バイオマスの収集範囲拡大に伴う輸送距離、輸送コストの増大の問題がある。半炭化（トレファクション）・ペレット化設備の大型化が進めば、これに伴うコスト削減が期待できる。

一方、アンモニアの場合は、天然ガスの原価に左右され、天然ガス単価の安い中近東でのアンモニア製造がより活発になれば、合わせてコストは低下するものと予想される。検討に使用したコストは、表 5 を参照されたい。

3-3-2. LCA (Life Cycle Assessment) 検討範囲

【LCA 検討範囲】

今回の既設石炭火力プラントでのバイオマス混焼とアンモニア混焼との比較に用いた、LCA 検討範囲は、表 3 に示すように海外での石炭採掘、木質バイオマス収集・ブラックペレット製造、或いは天然ガスからのアンモニア製造から国内の石炭火力発電所に受入及び燃焼時に発生する CO₂ 排出量、及び関連コストについて石炭専燃時を 100%とした時の相対値として比較検討するものである。(○印は、CO₂ 排出に関する検討箇所を示す)。尚、本検討にあたり、バイオマス或いはアンモニア混焼に伴う発電所設備改造に係るコスト、CO₂ 排出量は考慮の対象外とした。

表 3 LCA 範囲

項目	燃料		燃料		燃料		燃料	
	石炭	石灰石	石炭	バイオマス	石灰石	石炭	アンモニア	石灰石
○: 検討範囲								
1 燃料混焼率 (カロリー比)	(100%)	(100%)	(80%)	(20%)	(80%)	(80%)	(20%)	(80%)
2 CO ₂ 排出量	(ベース)	(ベース)						
a 素材・製造	○	○	○	○	○	○	○	○
	遼州・露天掘り採掘時の CO ₂ 発生量		遼州・露天掘り採掘時の CO ₂ 発生量	ブラックペレット製造時の CO ₂ 発生量		遼州・露天掘り採掘時の CO ₂ 発生量	天然ガスからアンモニア製造時のプロセスからの CO ₂ 発生量	
b 設備・部品								
c 輸送								
海外内陸輸送	○		○	○		○	○	
			遼州	カナダ		遼州	カタール	
	ベース		山元から港までの鉄道輸送の燃料から発生する CO ₂ 減量	森林から工場までの収集用トラック及び港までの鉄道輸送の燃料から発生する CO ₂		山元から港までの鉄道輸送の燃料から発生する CO ₂ 減量	パイプ輸送時の消費電力に係る CO ₂ 発生量	
海外港湾～日本の発電所パス	○		○	○		○	○	
国内内陸輸送		○			○			○
d 運用(発電)	○	○	○		○	○		○
(送電端)	燃焼による CO ₂	脱炭プロセス中の CO ₂	燃焼による CO ₂	考慮外	脱炭プロセス中の CO ₂	燃焼による CO ₂	無発生	脱炭プロセス中の CO ₂

注: 本検討は燃料比較ベースで、発電所内の混焼用追加設備は検討から除外

【バイオマス混焼プロセス】

上記の LCA 検討範囲において、想定したバイオマス混焼プロセスは以下の通り。

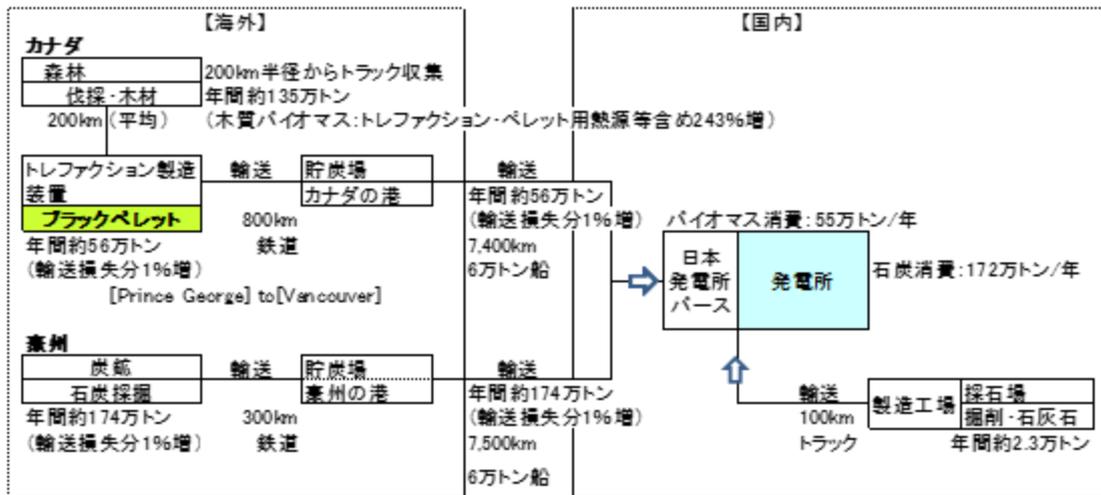


図 8 バイオマス混焼プロセス(カロリー比で 20%混焼)

【アンモニア混焼プロセス】

LCA 検討範囲において、想定したアンモニア混焼までのプロセスは以下の通り。

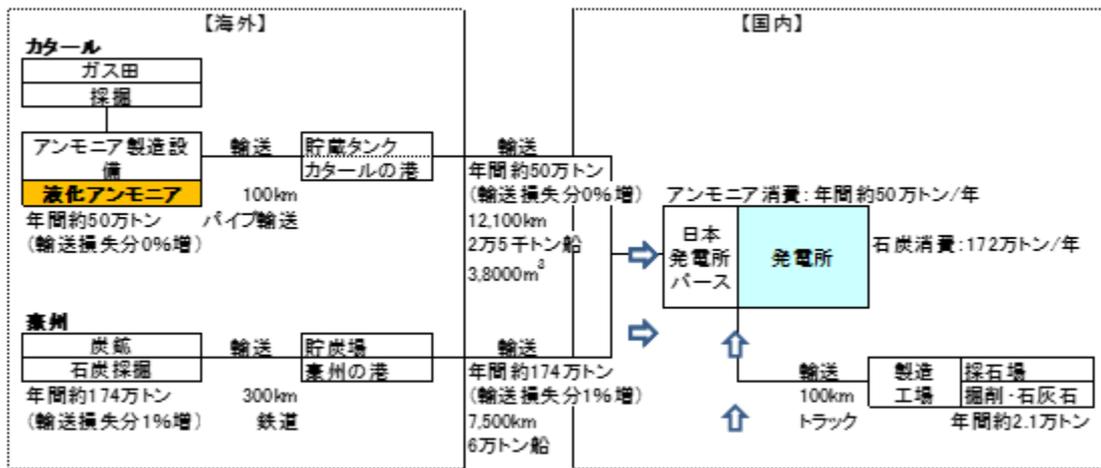


図 9 アンモニア混焼プロセス(カロリー比で 20%混焼)

【LCA 検討に用いた緒言】

LCA 検討に用いた緒言は下記の通り。

表 4 LCA 検討緒言

1	石炭火力プラント			
	混焼対象プラント		既設火力プラント- 1,000MW/600°C-USCクラス (15年運転プラント対象)	(10電力+JPOWER プラントを対象)
	プラント商業運転期間	年	40	電力中央研究所報告、日本における発電 技術のライフサイクルCO2排出量総合評 価・総合報告:Y06 (平成28年7 月)
	プラント残存期間	年	25	同上
	設備利用率	%	70	同上
	発電端熱効率(HHV) (70% 負荷)	%	39.6	同上
	所内率 (70%負荷)	%	6.9	同上
	輸入炭	kcal/kg	6,200	同上
	バイオマス(半炭化)ペレ ット	kcal/kg	4,800	(低温 トレフアクション)
	アンモニア	kcal/kg	5,370	
	燃料種類		石炭+20%木質バイオマ ス、或は 石炭+20%アンモニア	カロリー比にて20%混焼
	燃料調達箇所		石炭:オーストラリア バイオマス:カナダ アンモニア:カタール	西海岸から日本へ 天然ガスから製造、CCS考慮
2	燃料関連単位			
	海上輸送距離 (豪州~日本)	km	7,914	電力中央研究所報告、日本における発電 技術のライフサイクルCO2排出量総合評 価・総合報告:Y06 (平成28年7 月)
	海上輸送距離 (カナダ~日本)	km	7,391	同上
	海上輸送距離 (カタール~日本)	km	12,094	同上
	燃料消費原単位 (パナマックス級船舶: C重油)	L/t・km	0.000935	Energy in Japan, Jan. 2000 (電力中央研 究所1999年データベース)/エネ研:わが 国における化石エネルギーに関するライ フサイクル・インベントリー分析
	20tトラック(軽油)	km/l	2.2	経済産業省/環境省:燃料定数の設定方 法

3-3-3. LCA (Life Cycle Assessment) 評価

【LCA 評価結果】

表 5 に示すように既設 1,000MW-USC 石炭火力 (年間負荷率 70%) に、バイオマス 20%混焼、アンモニア 20%混焼(CCS 処理無し)或いはアンモニア 20%混焼(CCS 処理有り)した時の CO₂ 削減当りの相対コストは、バイオマス (ブラックペレット) 20%混焼時を 100%とすると、アンモニア混焼(CCS 処理無)、アンモニア混焼(CCS 処理有)の場合、それぞれ 346%、68%となり、バイオマス (ブラックペレット) 混焼に比し 32%分アンモニア混焼(CCS 処理有り)が有利な結果となった。ただし、本検討では、バイオマス或いはアンモニア混焼に必要な発電所での改造工事に係る改造費用及び CO₂ 排出分は考慮していない。これについては、今後の検討課題になる。

表 5 LCA 評価結果

項目		単位	石炭専焼	バイオマス 20%混焼	アンモニア 20%混焼 (CCS処理無)	アンモニア 20%混焼 (CCS処理有)
1	年間発電量					
	発電端	GWh	6,132			
	送電端	GWh	5,709			
2	CO ₂ 原単位	排出係数				
	石炭採掘	g-CO ₂ /kWh	69.13	50.51	50.51	50.51
	石炭海外現地輸送	g-CO ₂ /kWh	2.33	1.87	1.87	1.87
	石炭国際輸送	g-CO ₂ /kWh	11.98	9.59	9.59	9.57
	バイオマス原料生産	g-CO ₂ /kWh		3.98		
	バイオマス現地輸送	g-CO ₂ /kWh		8.62		
	トレファイド・ペレット 製造	g-CO ₂ /kWh		37.81		
	トレファイド・ペレット 現地輸送	g-CO ₂ /kWh		12.64		
	アンモニアSC	g-CO ₂ /kWh			169.98	25.56
	発電	g-CO ₂ /kWh	881.62	705.30	706.76	706.76
	石灰石利用	g-CO ₂ /kWh	0.03	0.03	0.03	0.03
	合計	g-CO ₂ /kWh	959.09	830.35	938.74	794.32
	差	g-CO ₂ /kWh	ベース	129	20	165
	削減比率	%	ベース	13	2	17
	年間CO ₂ 削減量	t-CO ₂ /年	ベース	735,000	116,000	941,000
3	削減CO ₂ 単位当りの費用 (発電所の改造費除く)	US\$/t- CO ₂	ベース	100%	346%	68%

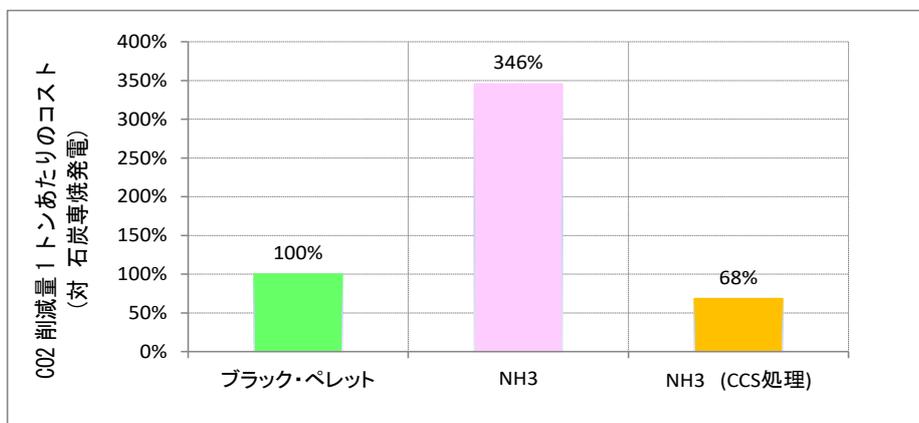


図 10 石炭混焼する際の CO₂ 排出量当りの燃料コスト(CIF)比較

3-3-4. 総合評価結果

技術面において、20%程度(カロリー比)のバイオマス混焼(ブラックペレット)及びアンモニア混焼は両方とも問題にはならない。問題は現状、両者共に高価格な燃料であること。特に、木質バイオマスの場合、広大な土地利用にリンクしており、需要拡大と共に、森林伐採地からの輸送距離が増大し、また量的にも、輸送能力からも供給面に不安があり、コストは更に上がる事が予想される。一方、アンモニアの場合、天然ガスからの製造を考慮しているため、量的な問題は少ない、またコストは天然ガスのマーケットに左右されるので、世界の天然ガス量から考えると、比較的安定するものと考えられる。中近東でのアンモニア生産が安定・拡大されれば、更に安くなることも十分予想される。

従って、地球温暖化・二酸化炭素削減を考慮すると、即効性のあるアンモニア混焼は、特に既設石炭火力への適用において、今後利用拡大が見込まれる。

表 6 調査結果要約

項目	バイオマス混焼	アンモニア混焼
1 制度面	FIT制度利用に限らず、認証された木質バイオマスの利用は環境保護のためにも必須条件である。	現状認証制度はないが、化石燃料からのアンモニア製造にCCSを利用したときには、何らかの認証を得られるようにし、よりCO2フリーであることを明記出来ることが望ましい。
	森林認証品(FSC FM/FSC CoC/PEFC)	
2 供給面	国内供給不足、輸入依存	国内供給不足、輸入依存
	FIT制度利用には、認証された木質材料の利用が必須条件である。日本では、各国の認証制度を適用したものであれば、問題なし。調達先のカナダは認証制度が確立されている。また、今のところ海外には十分な量があるが、欧米でも木質バイオマス使用量が急速に増えており、供給面、コストに不安が残る。	天然ガス、石炭燃料からのアンモニア製造は、量的には大きな問題にならない。将来は再生可能エネルギーを利用した水素或、アンモニア或は尿素製造することが予想される。
3 技術面	混焼率向上	30%程度までの混焼に技術的な大きな問題は認められない
	プラント効率維持	石炭専焼に比べてボイラー効率はやや低減するが混焼率を考慮すると大きな問題なし。
環境面	石炭専焼に比べ二酸化硫黄の低減、煤塵、NOx量はほぼ同じ。	石炭専焼に比べ二酸化硫黄、煤塵の低減、NOx量はほぼ同じ。
4 CO ₂ 削減面	カーボンニュートラルでCO ₂ 削減効果大	カーボンニュートラルでCO ₂ 削減効果大
	ただし、木質バイオマス収集、ブラックペレット製造、輸送等に係る過程でのCO ₂ 排出を出来るだけ抑える必要がある。	ただし、天然ガス或いは石炭ガスからの製造の場合、産出・製造過程でのCO ₂ 発生するので、EOR或はCCSの適用必要。
5 経済面	半炭化技術を採用することにより、取り扱いが容易で、長距離輸送が可能となり、またコストも低減できる。	中近東の天然ガスからアンモニアを製造(EOR或はCCSを採用)を考慮することにより、CO ₂ フリーコストの低減が図れる。

今後の課題として以下が上げられる。

【バイオマス混焼】

- ・半炭化（トレファクション）ペレット製造技術と大型化の今後の動向
- ・世界のバイオマス利用増大に合わせた、認証森林の拡大及び輸送インフラ状況
- ・世界におけるブラックペレットの価格動向

【アンモニア混焼】

- ・中近東におけるアンモニア製造コスト動向
- ・アンモニア製造時、適用される CO₂削減方法(EOR, CCUS, CCS 或いは再生可能エネルギーからの水素利用等)に伴う認証制度の確立

3-4. 日本における将来のアンモニア混焼導入可能性評価

3-4-1. アンモニア混焼導入可能な既設発電プラント総容量と総アンモニア使用量

現在、大手電力会社（10電力+JPOWER）の石炭火力発電容量は約 31GW、この内、石炭火力発電所の耐用年数を 40 年と仮定すると、運転期間が 15 年以上残っている既設火力プラントは約 22GW となる。これらのプラントの年間平均負荷率を 50%～70%及び 20%アンモニア混焼を考慮すると、最大年間約 800～1,100 万トンのアンモニア供給が必要となる。

また、現状の市況を考慮し、アンモニア単価を約 US\$300/t-NH₃(CIF)と想定すると、年間アンモニアコストは約 2,300～3,200 億円、或は半分のプラントとしても約 1,150～1,600 億円の規模となる。

3-4-2. アンモニア混焼既設発電プラントの潜在的な CO₂削減総量

本調査で検討の結果、既設石炭火力プラント(1,000MW)に 20%アンモニア混焼（負荷率 70%）(CCS 処理有り)を考慮すると 165g-CO₂/kWh(送電端)の削減が期待できる。上記 22GW の内、半数のプラントが 20%アンモニア混焼したと仮定すると、年間 CO₂削減総量は約 1,600 万トンであり (165x22,000,000x1/2x24x365x10⁻⁶)、日本の総排出量の約 1.3%相当の削減となる。

3-5. まとめ

3-5-1. アンモニア混焼の優位性

バイオマス混焼と比べたときのアンモニア混焼の優位性は、十分な供給量と将来のコスト削減の可能性にある。課題としては、中東の天然ガスからアンモニア製造するときの、EOR 或は CCS に有利な場所の確保、市場での購買競争力強化と共にアンモニア代の低コスト化に掛かっている。バイオマス利用における、需要拡大による供給の不確実性、コスト増大の可能性を考慮すると、アンモニア混焼は地球温暖化対応、二酸化炭素削減効果の高い有望な選択肢の一つである。

3-5-2. 課題及び結論

CO₂フリー水素からのアンモニア製造・利用が商業的に成立するためには、CO₂フリー水素製造、アンモニアへの転換、輸送、消費地での発電という一連のチェーンでの技術的・経済的な優位性が求められる。こうした優位性の検討のためには、サプライチェーンを構成する各ステップにおけるコストおよ

びエネルギー効率の評価を通じて最終的な発電単価を評価し、これを他の CO₂フリーな発電技術と比較することが必要である。

石炭火力発電の低炭素化を推進する技術として、石炭火力発電へのバイオマス混焼やアンモニア混焼は比較的初期投資が少なく、即効性のある低炭素化技術である。バイオマス混焼はすでに商用化が進んでいるが、アンモニア混焼は実証段階にあり、社会的受容性の明確化を踏まえて、早期商用化が期待されている。そこで本調査では、既存の石炭火力でのバイオマス混焼の実例調査、アンモニア混焼の実証調査を行い、アンモニア混焼とバイオマス混焼の比較検討を行った。

バイオマス混焼と比べたときのアンモニア混焼の優位性は、十分な供給量と将来のコスト削減の可能性にある。課題としては、中東の天然ガスからアンモニア製造するときの、EOR 或は CCS に有利な場所の確保、市場での購買競争力強化と共にアンモニア代の低コスト化に掛かっている。一方でバイオマス利用においては、需要拡大による供給の不確実性、コスト増大の可能性を考慮すると、アンモニア混焼は地球温暖化対応、二酸化炭素削減効果の高い有望な選択肢の一つである。

3-6. 今後の課題

CO₂フリー水素からのアンモニアを石炭火力発電への混焼として利用する場合の適用可能性をバイオマス混焼と比較することにより調査を実施した。比較調査項目は、認証、供給、技術、CO₂削減、ライフサイクルコストを含めた経済面等、総合的に評価した。

その結果、既述のようにアンモニア混焼は十分な供給量と将来のコスト削減可能性がある一方で、課題として中東で天然ガスから既存製法でアンモニア製造する場合の製造時 CO₂削減であることが判明した。この対策として EOR 或いは CCS が考えられるが、その場合には EOR 或いは CCS の適地の確保が必要である。既存製法からの供給と平行して、より安価な再生可能エネルギーを利用した CO₂フリーアンモニアの開発・利用を促進することで、市場での購買競争力強化と共に混焼用アンモニアの一層の低コスト化を進める事が有効な道筋と考える。

また本調査では、CIF 価格での CO₂削減量あたりの比較調査としたが、アンモニア混焼の社会実装に際しては、サプライチェーンのインフラ整備まで含めた多角的な検討が必要である。

4. 外部発表実績

(1) 論文発表

<査読付き> なし

<査読なし(総説等含む)> なし

(2) 学会、展示会等発表

<招待講演> なし

<口頭発表> なし

<ポスター発表> なし

<展示会、ワークショップ、シンポジウム等> なし

(3) プレス発表
なし

(4) マスメディア等取材による公表
なし

5. 特許出願実績

	出願番号	発明の名称	出願年月日	出願人
1	なし			

6. 参考文献

本文中に出典として記載