

木質バイオマス高比率混焼システムへの挑戦

Meeting the Challenge of Realizing a High Ratio Co-Firing System with Woody Biomass

河 西 英 一	エネルギー・プラントセクター事業開発部 課長
福 島 仁	エネルギー・プラントセクターボイラプラント事業部保守技術部 部長
田 村 雅 人	エネルギー・プラントセクター事業開発部 部長
犬 伏 和 之	千葉大学大学院園芸学研究所 教授
中 田 俊 彦	東北大学大学院工学研究科 教授

微粉炭焼き火力発電所はベースロード電源として重要でありながら CO₂ 排出量が多く、この削減が必須とされている。カーボンニュートラルな木質バイオマスの混焼はその有力な手段であるが、国内に豊富な森林資源をもちながらも実際の混焼率は数%（熱量比）程度にとどまっている。当社は、熱量ベースで 50%混焼を目標とし、木質バイオマスのサプライチェーンを含むトータルシステムの検証と実証に大学と連携して取り組んだ。最終年（2015年）度には、森林伐採から収集、加工、輸送、150 MW 級商用火力発電所での混焼発電に至る実証試験を実施し、純国産燃料を用いて混焼率 25%（熱量比）を実証した。

Although pulverized coal-fired power plants are important as base-load power sources, they emit a large amount of carbon dioxide (CO₂). Given this, it is necessary to reduce their CO₂ emissions, and co-firing with carbon-neutral woody biomass is an important measure for achieving this. However, while Japan possesses an abundance of forest resources, the actual biomass-to-coal ratio achieved in co-firing remains as low as a few calorific percent. Aiming to achieve 50% co-firing on a thermal basis, IHI has been working to verify and demonstrate the effectiveness of a comprehensive system — including the supply chain for the woody biomass — in cooperation with some universities. Eventually, in FY2015, IHI carried out demonstration experiments involving processes from logging, wood collection, processing, and transportation through to co-firing power generation at a 150 MW-class commercial thermal power plant. These experiments demonstrated that a co-firing biomass-to-coal ratio of 25% (thermal basis) can be achieved using purely domestic fuel.

1. 緒 言

現在、国内においては火力発電は電力供給を担う最も重要な基盤電力となっている。この火力発電用燃料のなかで石炭は広域から安定供給が確保でき、価格も安価な点で優れているが、高い CO₂ 排出原単位が温暖化対策上の大きな課題となっている。この原単位低減策として石炭をカーボンニュートラルな木質バイオマス（以下、バイオマス）燃料へ転換していくことが考えられる。

また、国内の木材資源は材積量が年々増加し戦後最大量に達しているが、木材需要が低迷し価格も下落するなか、未利用木材が多い。この大量の未利用木材を長期安定的に大量需要がある発電事業へ有効活用することは、温暖化対策だけでなく国産の持続可能なエネルギー源として、エネルギーの自給率上昇や化石燃料の輸入削減による貿易収支の点からのメリットも期待される。

これに加えて、国内の石炭焼き火力でのバイオマス混焼では、下記の技術的メリットも想定される。

- (1) 世界的にも高効率の発電設備で固体燃料を直接利用すれば、ガス化、液化などへの変換ロスがないため、高いエネルギー効率が達成できる。
- (2) 国内の大型石炭焼き火力発電設備は厳しい基準を満たした排ガス処理環境設備をもっており、石炭と類似の性状のバイオマスを導入すれば、新たな環境負荷増加、大幅な追加設備や改造費用も抑えられる。
- (3) 混焼システムは一方の燃料が万一、供給不足となった場合には他方で補填できる融通性があり、運用上の安定性が高い。

国内の大型石炭焼き火力の主流は微粉炭焼きであり、前述のメリットからすでに各所で混焼が試みられているが、現状では下記の二つの大きな問題がある。

- (1) バイオマスの混焼比率が低い。大型石炭焼き火力で主流の微粉炭焼きボイラ方式においては、技術的な制約によって熱量比で数%程度のバイオマス混合燃焼にとどまっている。
- (2) 大量のバイオマス燃料の安定な供給体制が確立さ

れていない。

2. 取組みの経緯

上記の課題を解決するため、当社は東北大学、千葉大学と共同で、2011年度から2012年度に環境省からの委託事業「地球温暖化対策技術開発事業・実証研究事業：石炭焚火力のCO₂排出原単位半減に向けたバイオマス高比率混焼技術の開発」⁽¹⁾を受託した。森林組合、木材業者などの協力を受けながら、小規模ながら木材の収集、燃料加工から、各工程間長距離輸送、燃焼利用までのすべての工程について一貫通貫の試験を実施した。さらに、要素試験と検討を行い、これらを総合して、国内産バイオマス燃料を、バイオマス専焼バーナを用いた炉内混焼で高比率混焼することが、エネルギー利用効率および経済性などの条件を満たし実現性があるとの試算結果を得た。

しかし、商用微粉炭焚き火力発電所（事業用ボイラ）の規模は多くが500 MW以上であるため、設備改造投資は巨額になる。かつ、発電事業者側には需要者への電力安定供給責任があるため、実績がなければバイオマスの大量導入には踏み切れないと予想された。また、国内林業関係者へのヒアリングなどによって、下記の点に課題があると考えられた。

- (1) 大量の安定継続的なバイオマス燃料需要の保証
- (2) 採算可能な生産コスト
- (3) 安価な外材、違法伐採材の市場への混入

(1)は発電事業者側の懸念と表裏一体の課題である。(2)は前述の検討からも現行の建材利用を基準とした収集方法（形状重視）は効率と経済性が良くないことが明らかになっており、効率的な収集、加工法の確立が必要である。(3)は現行の流通形態のままでは、厳密な管理（他地域材や外材との識別など）が困難である。このため、仮に(1)が確立された場合には、発電所近郊などからの無理な収集、違法伐採、乱伐などにより森林資源を損なう恐れがある。

このため、当社は、前述の調査、開発で得た技術と貴重な知見を活かして、上記の課題に応える商用規模での実証試験（新日鐵住金株式会社釜石製鉄所の発電設備：発電出力149 MW）を含む、より大規模な一連の実証試験を行い、これを重要なマイルストーンとして、国内の石炭焚き火力への導入を促進することを環境省の「CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業」⁽²⁾に提案し、採択された。

これらの経緯を受けて早期実用化も目指し、フルスケールでのトータルシステム実証を主体とした一連の取組みとその成果を以下に述べる。

3. 実施内容

この事業は、全体システム確立のうえでボトルネックとなる事項を想定し、以下の三つの課題に分けて実施した。

- (1) 混焼ボイラシステム（燃料ハンドリング、排ガスシステム、発電所全体構成）
- (2) 燃焼システム（燃焼バーナおよび燃料粉碎システム）
- (3) 燃料供給システム（山元から発電所までのバイオマス燃料供給）

以下に詳細を述べる。

3.1 混焼ボイラシステム

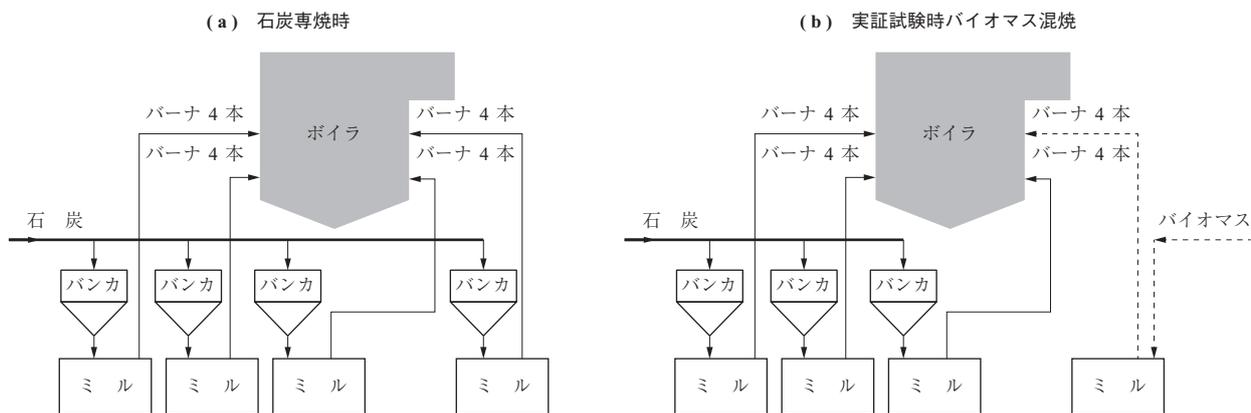
3.1.1 システム構成

150 MW級商用機で高比率バイオマス混焼実証試験を行うため、バイオマス燃料をボイラへ搬送する前処理システムを検討した。今回実証試験を行ったボイラは、以前から低い混焼率でバイオマスの混焼を実施していたが、石炭ミルの粉碎能力を増大してさらに混焼率を上げるため、ミルおよびこれに対応するバーナを1系列追設している。この追設した系列を利用し、仮設の搬送設備を設置して実証試験を実施した。1系列での運用確認ができれば、バイオマスの系列数を増やすことで、より高い混焼率に対応できることになる。第1図に実証試験設備構成、第2図に実証試験前処理設備機器配置を示し、第1表に実証試験概要を示す。搬送システムの一部を成すフローコンベヤなどについては、バイオマス搬送試験を工場で行い、安定した搬送が行えることを事前に確認した。

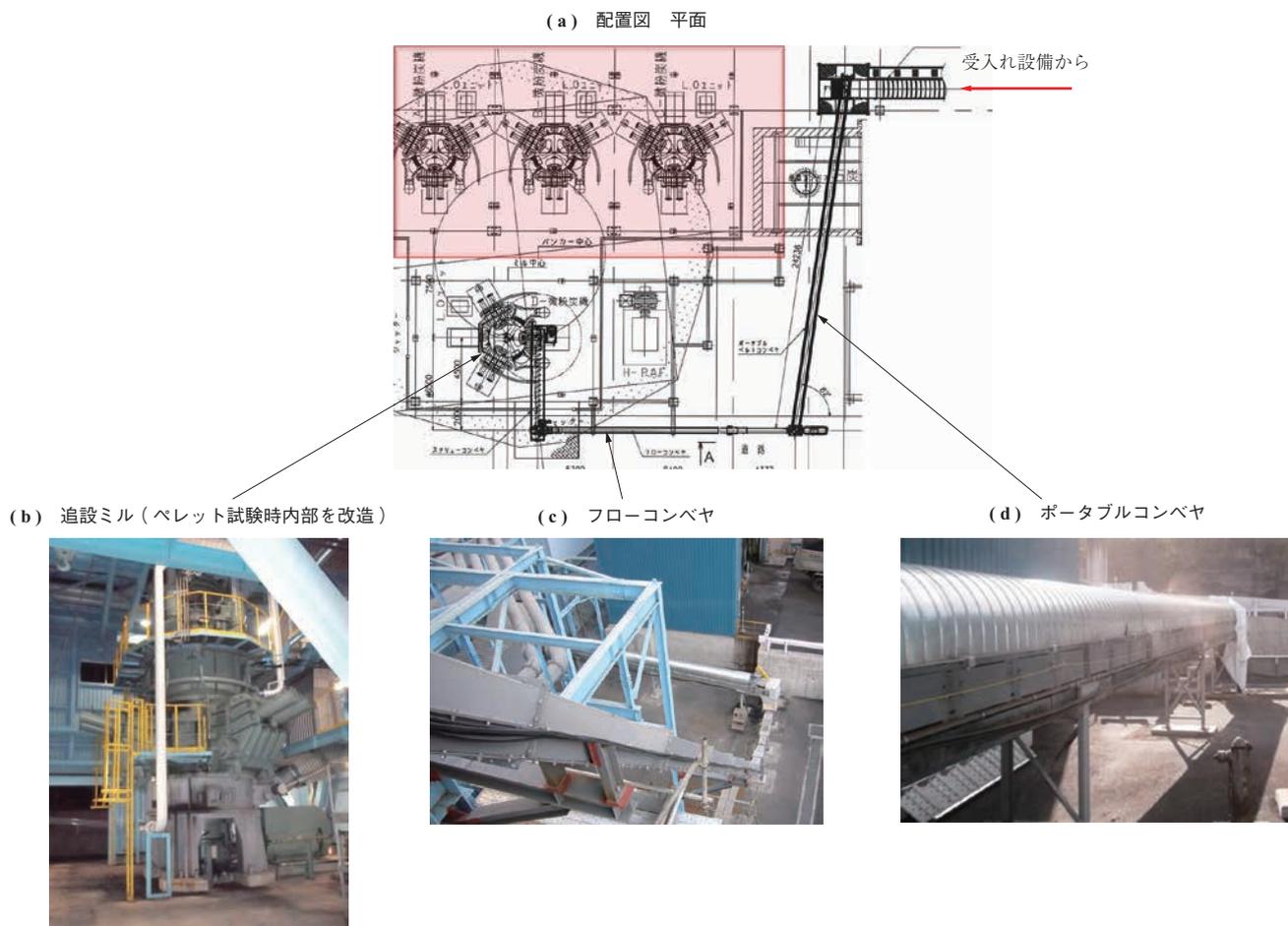
実証試験は木質ペレット（以下、ペレット）、木質チップ（以下、チップ）の2種で行い、ペレットでは石炭ミルの内部を改造し粉碎能力を上げた。チップについては過去の経験を参考に、あらかじめ乾燥破碎された細粒チップで実施した。3.2節で述べるように、石炭ミルでペレット、チップの単独粉碎試験を実施し、その結果から混焼率を決めた。

3.1.2 貯蔵・搬送システムの検討

ペレット、チップ（50 mm以下）、細粒チップ（5 mm以下）について、乾燥、未乾燥の状態を含め、実機を模倣したモデル装置を使い貯蔵・搬送の実証試験を実施した。ペレットでは石炭と同等の扱いができたが、チップで



第1図 実証試験設備構成
Fig. 1 Configuration of equipment



第2図 実証試験前処理設備機器配置
Fig. 2 Placement of pretreatment equipment in the demonstration experiment

第1表 実証試験概要
Table 1 Overview of the demonstration experiments

試験条件	概要	バイオ混焼率(熱量比)(%)
乾燥細粒チップ ・単独粉碎 ・単独燃焼	裁断されあらかじめ乾燥したチップ(5mm以下,水分約10%)を,4基の石炭ミルの1基で単独粉碎し,そのミルに接続する石炭バーナで単独燃焼する.	8
ペレット ・単独粉碎 ・単独燃焼	4基の石炭ミルの1基をペレット粉碎に適した構造に改造して,ペレットを単独粉碎し,そのミルに接続する石炭バーナで単独燃焼する.	25

は石炭に比べ流動性が悪く、特性に適した貯槽構造および払出し機構にする必要があることが分かった。この結果に基づき、バイオマス貯蔵搬送システム（第3図）を計画した。バイオマスは、試験前にあらかじめ下記の必要量を調達し、発電所内に貯蔵しておくことにした。

乾燥細粒チップ 約 500 m³（かさ比重 0.2 t/m³ として約 100 t）

ペレット 約 1 000 m³（かさ比重 0.6 t/m³ として約 600 t）

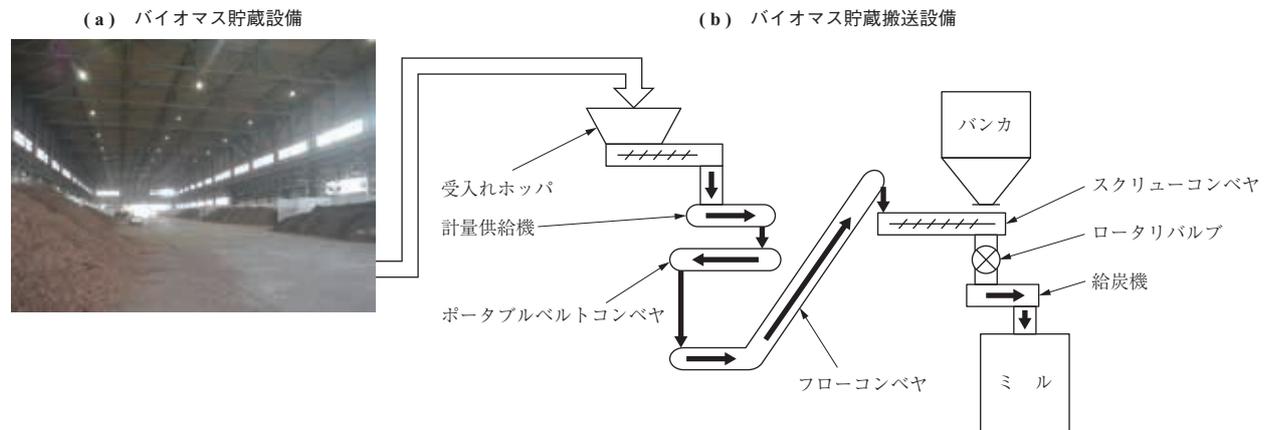
貯蔵・搬送に際し、ペレットは水分を吸収すると形状が崩れるので有蓋トラックでの搬送、屋内貯蔵とした。第4図に実証試験バイオマス搬入・貯蔵状況を示す。また、長期貯蔵による火災防止を図るため、堆積されたペレット内部に温度計を挿入し、貯蔵期間中は定期的に温度監視を行った。今回の約2か月間の堆積貯蔵では、酸化や発火による温度上昇は認められなかった。

3.1.3 実証試験の結果

150 MW 級商用機において、乾燥細粒チップ、ペレットの混焼実証試験を実施した。実証試験の代表データおよび

ペレット 25%混焼トレンドデータを、それぞれ第2表、第5図に示す。単独燃焼・単独粉碎による乾燥細粒チップとペレットの燃焼試験においては、石炭専焼状態にバイオマス燃料を追加しながら負荷調整を行うため、定格負荷から5%程度負荷を下げることで過負荷への制御上の裕度を設け、安定した商用運転が行えるよう試験を実施した。乾燥細粒チップの試験ではバーナ容量に比べ8%と燃焼量が少ないため、点火バーナ（重油燃焼）を常時使用した。この結果、いずれの試験も安定した燃焼を示し、バイオマス混焼に起因する不具合はなかった。

混焼率25%目標（実績最大26%）までペレットを混焼したが、ボイラ取熱は石炭専焼時とほぼ同等であった。バイオマス燃料には、灰分、窒素分、硫黄分がほとんど含まれないため、ボイラ出口の煤じん、窒素酸化物（NO_x）、硫黄酸化物（SO_x）の排出量は、混焼割合に比例して減少した。石炭ミル3基運転の石炭専焼の場合に比べ実証試験のバイオマス混焼ではミル4基運転となり、①ミルに投入する一次空気量が増える②保安上からバイオマスミル入口一次空気温度を石炭ミルより下げる必要がある、な



第3図 バイオマス貯蔵搬送システム
Fig. 3 Storage and transport system



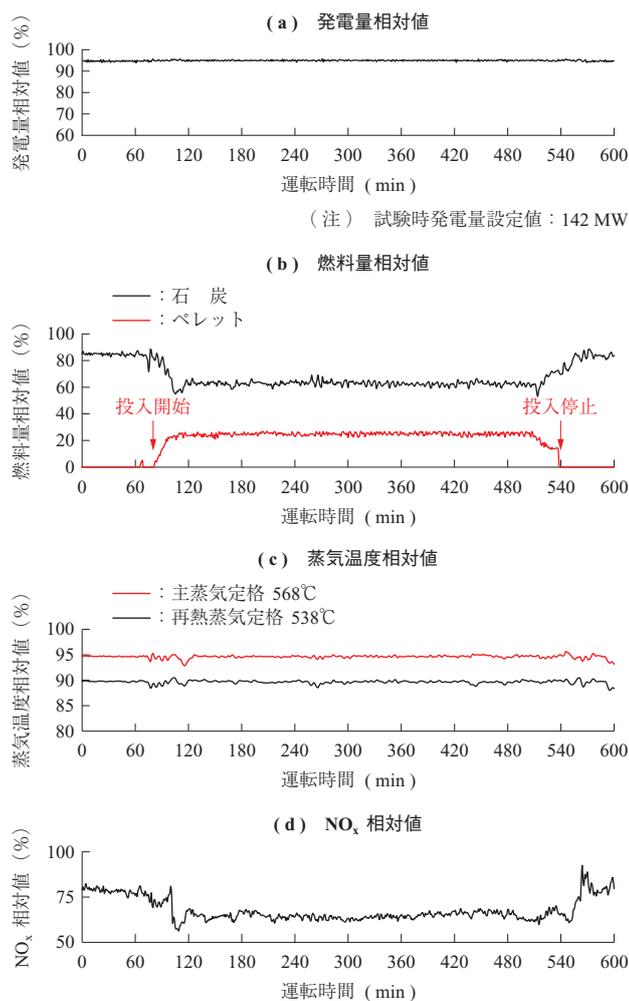
第4図 実証試験バイオマスの搬入・貯蔵状況
Fig. 4 Biomass carry-in and storage in the demonstration experiment

第 2 表 実証試験 代表データ

Table 2 Representative data from the demonstration experiments

項 目	単 位	試 験 内 容		
		乾燥細粒チップ 8%混焼 ミル 4 基運転	ペレット 25%混焼 ミル 4 基運転	石炭専焼 ミル 3 基運転
発 電 量	MW	142	142	148
主 蒸 気 温 度	℃	568	568	568
再 熱 蒸 気 温 度	℃	538	538	538
給 水 温 度	℃	275	275	277
石 炭 発 熱 量 (低 位)	kJ/kg	26 220	26 220	26 220
	kcal/kg	6 260	6 260	6 260
バ イ オ マ ス 発 熱 量 (低 位)	kJ/kg	17 190	1 710	-
	kcal/kg	4 110	4 230	-
重 油 発 熱 量 (低 位)	kJ/kg	40 690	-	-
	kcal/kg	9 720	-	-
石 炭 投 入 量	% *1	88	74	100
ペ レ ッ ト 投 入 量	% *1	8	26	-
重 油 投 入 量	% *1	4	-	-
ボ イ ラ 効 率 (低 位 基 準)	相 対 値 *2	0.997	0.996	1.0 と する
現 地 計 測	NO _x	相 対 値 *2	0.84	0.73
	煤 じ ん (ボ イ ラ 出 口)	相 対 値 *2	0.72	0.65

(注) *1: 熱量比
*2: 石炭専焼時に対する相対値



第 5 図 実証試験ペレット 25%混焼トレンドデータ

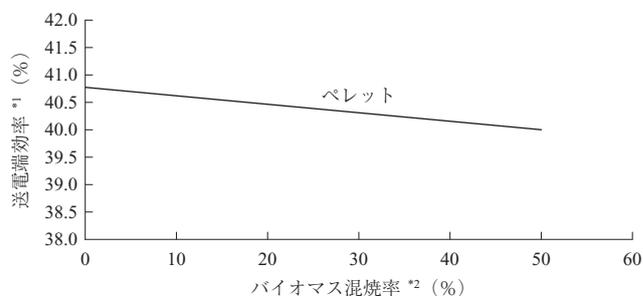
Fig. 5 Demonstration experiment: Trend data for co-firing with 25% pellet fuel

どの影響からボイラ効率は混焼時に 0.3 ~ 0.4% (相対値) 下がる結果となった。

実証試験の結果を基に、既設 500 MW 級微粉炭焼き火力発電所で、ペレットを 50%混焼した場合の予想送電端効率を検討した。結果を第 6 図に示すが、ペレットの混焼率を増やすと、一次空気量増加による動力の増加などから、送電端効率は下がる傾向になる。

3.1.4 燃焼灰の影響

バイオマス燃料の灰分は石炭の 1/10 以下と少ないが、塩基性成分が高いなど成分は異なり、燃焼灰の影響を確認する必要がある。実証試験は短期であり混焼による灰付着変化や管材の腐食など、長期にわたる影響の評価は難し



(注) *1: 高位発熱量基準
*2: 熱量比

第 6 図 500 MW 級微粉炭焼き火力発電所におけるバイオマス混焼時の送電端効率

Fig. 6 500 MW-class pulverized coal-fired model power plant: Net thermal efficiency in biomass co-firing

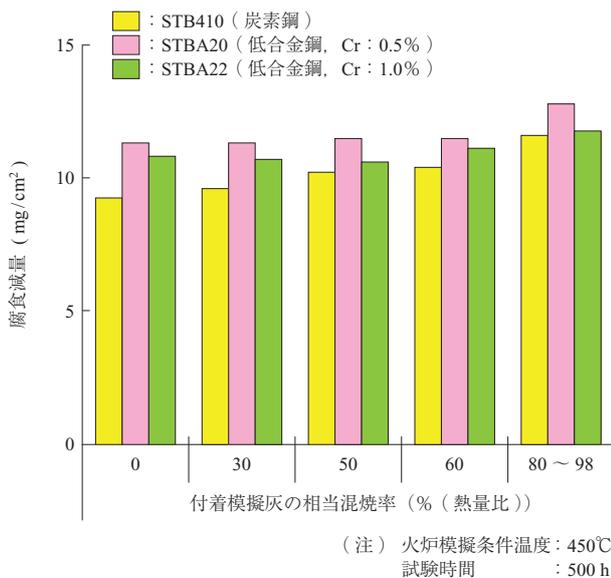
い。このため、小型燃焼炉で石炭とバイオマスを混焼し、その燃焼灰の成分を模擬した灰を伝熱管材料に塗布し、ボイラ内部の温度、ガス雰囲気中に暴露する腐食試験を実施した。第7図は、火炉の伝熱管に使われる管材で腐食試験を実施した結果で、石炭専焼の灰からバイオマス 80～98%混焼相当までの灰で試験したが、腐食量に大きな差はなかった。

150 MW 実証試験では、伝熱管を模擬したプローブを火炉に挿入して伝熱管近傍の付着灰を回収し、性状を分析した。この分析結果を基に模擬灰を調製し、腐食試験を行った。この結果、バイオマス混焼によって、過熱器近傍では付着灰中のアルカリ、硫酸塩などの濃度が石炭専焼時より増大したが、増大幅は $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 濃度換算で 0.15 wt%程度であり腐食への影響は小さいことが分かった。第8図に過熱器条件でのステンレス鋼の腐食減量に及ぼす灰組成およびバイオマス混焼率の影響を示す。また、バイオマス 25% (熱量比) 混焼条件下の火炉壁バーナ近傍では、付着灰の未燃カーボンが多い還元性の強い環境になり、石炭専焼環境下より腐食量が増加傾向にあるが、増加量は小さく実用上は問題ないレベルと考えられる。第9図に火炉壁条件での Cr-Mo 鋼の腐食減量に及ぼす雰囲気ガス、灰種類の影響を示す。

3.2 燃焼システム

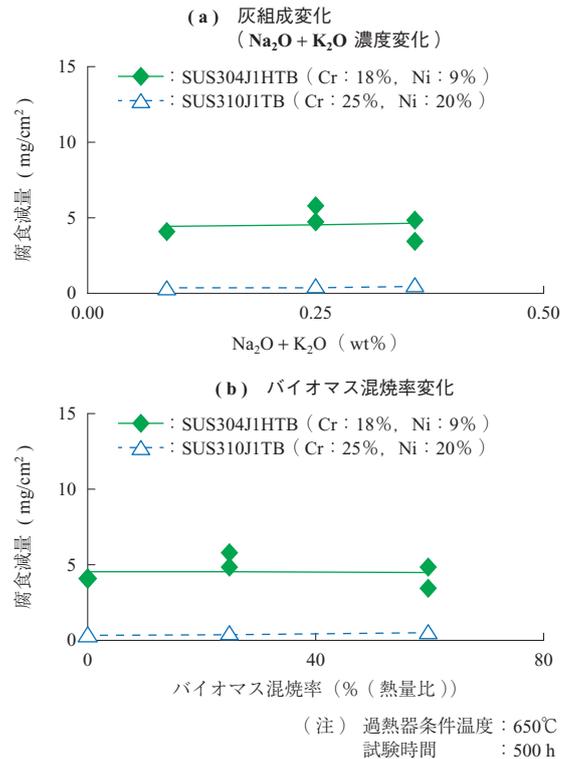
3.2.1 これまでの経緯

現状の商用微粉炭焚き火力発電所においては、石炭・バ



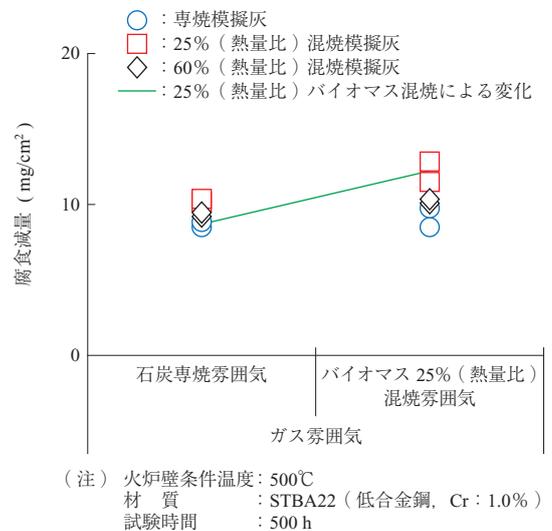
第7図 火炉模擬条件下での灰付着腐食試験による各合金鋼の腐食減量比較

Fig. 7 Ash deposition and corrosion test conducted under furnace simulation conditions at 450°C for 500 hours comparison of corrosion weight loss for each alloy



第8図 過熱器条件でのステンレス鋼の腐食減量に及ぼす灰組成およびバイオマス混焼率の影響

Fig. 8 Influence of ash composition and biomass co-firing ratio on corrosion of stainless steel under superheater conditions



第9図 火炉壁条件での Cr-Mo 鋼の腐食減量に及ぼす雰囲気ガス、灰種類の影響

Fig. 9 Effect of atmospheric gas and ash type on corrosion of Cr-Mo steel under furnace wall conditions

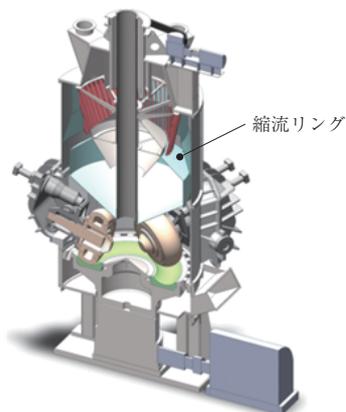
バイオマス混合粉碎の上限が約 5%以内であり、高比率混焼には、バイオマスの単独粉碎を行う必要がある。しかし、石炭用の壺型ローラミルをそのまま使用してバイオマス単独粉碎を行った場合、チップ・ペレットのいずれの場合でも、粉碎容量が石炭の 1/7～1/10 になってしまう。この原因となっている粉碎生成物のミル外への排出不良の対策

として、第10図に示す縮流リングを設置し、実証試験を行った。この結果、ペレットにおいて石炭粉碎時と同等（質量比100%）以上の粉碎容量増大を達成できることが2013年度までに確認できた。これをさらに改良して2014年度には各種チップとペレットの粉碎・燃焼特性を把握し、これを基に社内での大型燃焼試験設備で混焼試験を行った結果、50%超の混焼に成功した。

上記の結果を基に、2015年度に150 MW級商用機において、チップとペレットの粉碎・燃焼の実証試験を実施した。

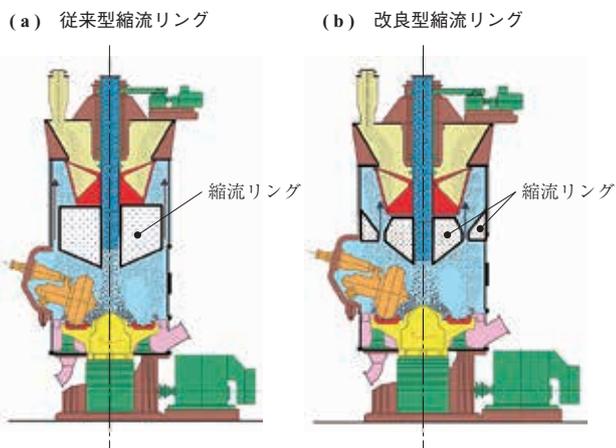
3.2.2 燃料処理システムの検討

第11図に縮流リング付きペレットミルを示す。2014年度までに、改良型の縮流リング付きペレットミル（第11図 - (b)）を設計し、ペレットでは石炭比最大で熱量比75%、質量比100%以上の粉碎容量を確認した。第12図にペレットミルおよび石炭ミルにおける燃料供給量とミル差圧の関係を示す。



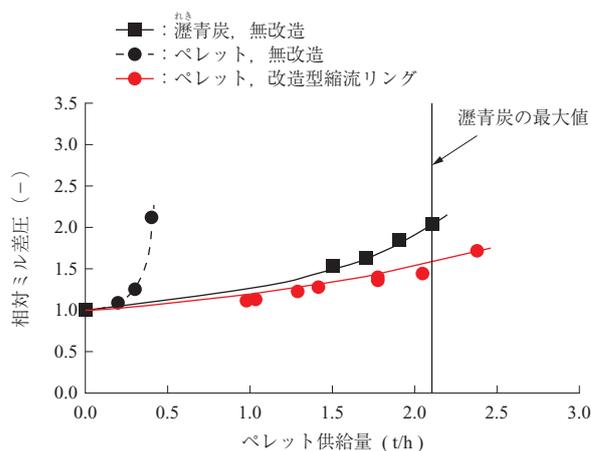
第10図 縮流リング付きミルの概略

Fig. 10 Schematic drawing of a mill equipped with a contraction flow acceleration ring



第11図 縮流リング付きペレットミル

Fig. 11 Wood pellet mill equipped with a contraction flow acceleration ring



第12図 ペレットミルおよび石炭ミルにおける燃料供給量とミル差圧の関係

Fig. 12 Relationship between fuel (pellet or coal) supply and mill differential pressure in wood pellet mill or coal mill

実証試験では既存の微粉炭焚きボイラの改造範囲を最小限とし、国内のバイオマスの供給状況（チップが多い）も考慮して、以下の6項目の検証を行った。以下に結果とともに述べる。

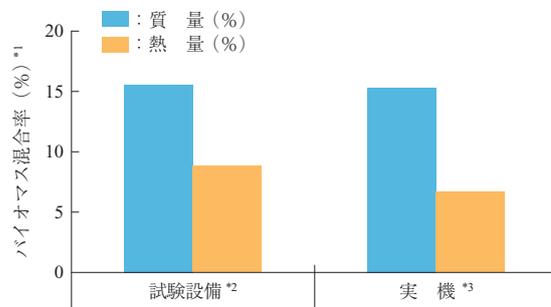
(1) 細粒チップ混合粉碎

石炭とバイオマスを同じ石炭ミルで粉碎する方法（混合粉碎）において、細粒チップ（5 mm 以下、水分約30%）を用い、混合率最大質量比で15%、熱量比で6.5%での安定的な粉碎を確認した。

この結果、社内試験と同じ混合率15%（質量比）を達成することができた。第13図に石炭と細粒チップを用いた混合粉碎試験結果を示す。なお、混合率の増加によってミル差圧も増加する傾向を示した。

(2) 細粒チップ単独粉碎

細粒チップでの高比率混焼を目的とし、乾燥細粒



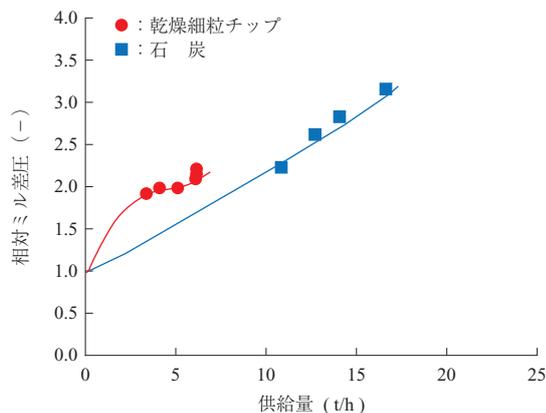
(注) *1: バイオマス混合率 = バイオマス供給量 / 石炭供給量
*2: チップ大きさは5 mm 以下
水 分 = 13%
*3: チップ大きさは5 mm 以下
水 分 = 33%

第13図 石炭と細粒チップを用いた混合粉碎試験結果

Fig. 13 Results of mixed grinding experiment using coal and fine grain chips

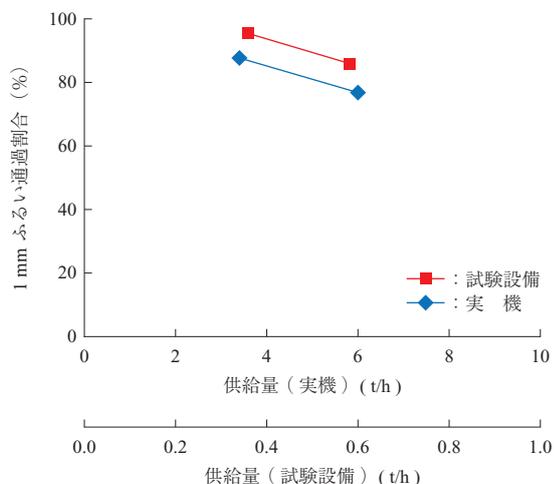
チップ（5 mm 以下，水分 10%）を石炭ミルで単独粉砕可能か確認した。

この結果，計画どおり火炉の投入熱量に対する混焼率で 8%に相当する供給量を粉砕できることが確認された。第 14 図に乾燥細粒チップ粉砕時の相対ミル差圧を示す。社内試験と同様に，ミルの安定運転の指標である相対ミル差圧は乾燥細粒チップ供給量の増加とともに増加する傾向を示した。第 15 図に乾燥細粒チップ粉砕時の粉砕生成物の 1 mm ふるい通過割合を示す。粉砕生成物の 1 mm ふるい通過割合も低くなる傾向を示した。乾燥細粒チップの相対ミル差圧は同じ供給量では石炭粉砕時より高く，ミルの処理能力は石炭と比較して乾燥細粒チップの方が低下した。単独粉砕は，細粒チップの処理量（混焼率）を混合粉砕より増やすことができ，粉砕生成物



第 14 図 乾燥細粒チップ粉砕時の相対ミル差圧（実機）

Fig. 14 Relative mill differential pressure in grinding of dry fine-grain chips (Real machineactual power plant)



第 15 図 乾燥細粒チップ粉砕時の粉砕生成物の 1 mm ふるい通過割合

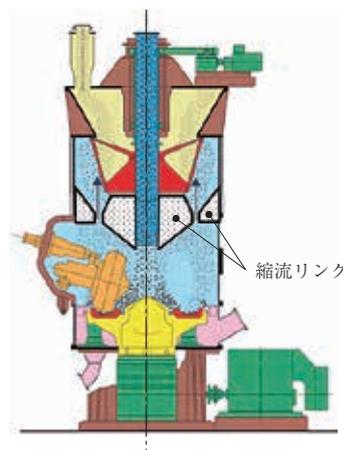
Fig. 15 Passing ratios for pulverized product of dry fine-grain chips passed through a 1-mm sieve

の粒径もほぼ燃焼に適した大きさにすることができると。ただし，本条件ではチップは既存の石炭バーナの容量に対して熱量（負荷）が少なく，助燃なしでは燃焼が維持できない点は課題として考慮する必要がある。

(3) ペレット単独粉砕

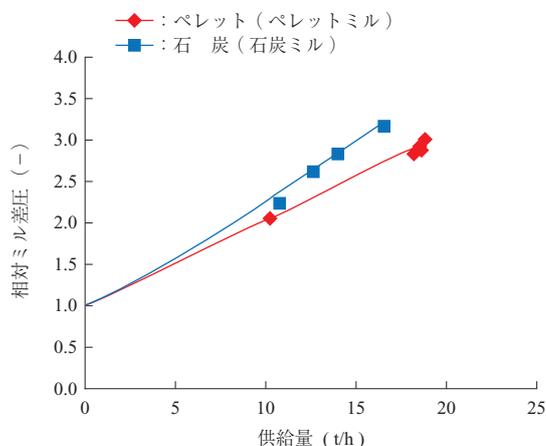
ペレットの高比率混焼を目的とし，石炭ミル内部に縮流リングを取り付けたミルを用いて単独粉砕の確認を行った。第 16 図に縮流リング付きペレットミルを示す。

この結果，火炉の投入燃料に対する混焼率 25%に相当する供給量で安定的に粉砕することを確認できた。第 17 図にペレット粉砕時の相対ミル差圧を示す。社内試験と同様にミルの安定運転の指標である相対ミル差圧はペレットの供給量の増加とともに増加する傾向を示した。第 18 図にペレット粉砕時の粉



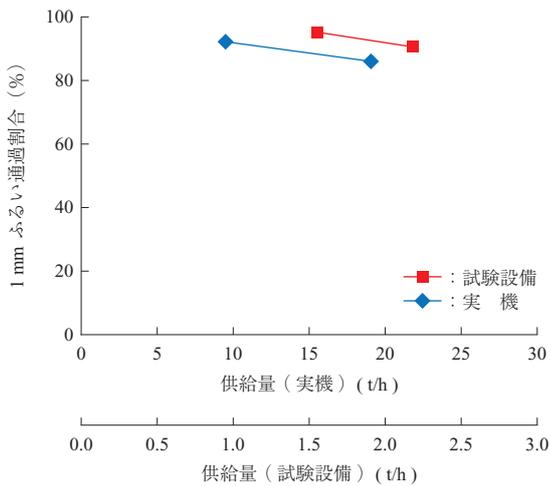
第 16 図 縮流リング付きペレットミル

Fig. 16 Wood pellet mill equipped with a contraction flow acceleration ring



第 17 図 ペレット粉砕時の相対ミル差圧（実機）

Fig. 17 Relative mill differential pressure in pulverizing of wood pellets (Real machineactual power plant)



第 18 図 ペレット粉碎時の粉碎生成物の 1 mm ふり通過割合
 Fig. 18 Passing ratios for pulverized product of wood pellets passed through a 1-mm sieve

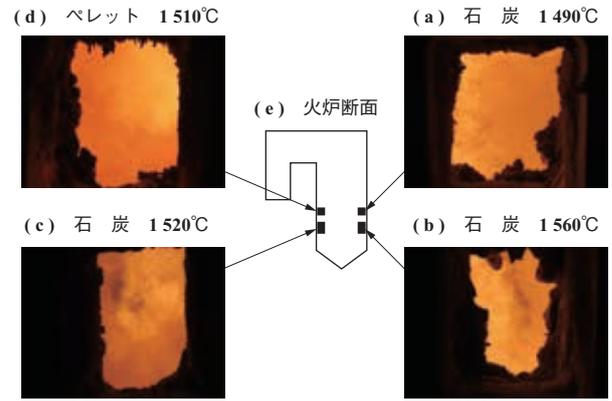
砕生成物の 1 mm ふり通過割合を示す。粉碎生成物の 1 mm ふり通過割合も低くなる傾向を示した。相対ミル差圧は、同じ供給量で石炭粉碎時よりやや低く、縮流リングの効果によってミルの処理能力が向上している。

(4) バーナシステム

第 19 図にペレット混焼試験時の火炎の様子（実機）を示す。試験では、計画の供給量を、無改造の石炭用バーナで安定的に燃焼できることを確認した。ペレットの粉碎生成物の火炎は石炭に比べるとやや暗い。

(5) 50%超混焼試験

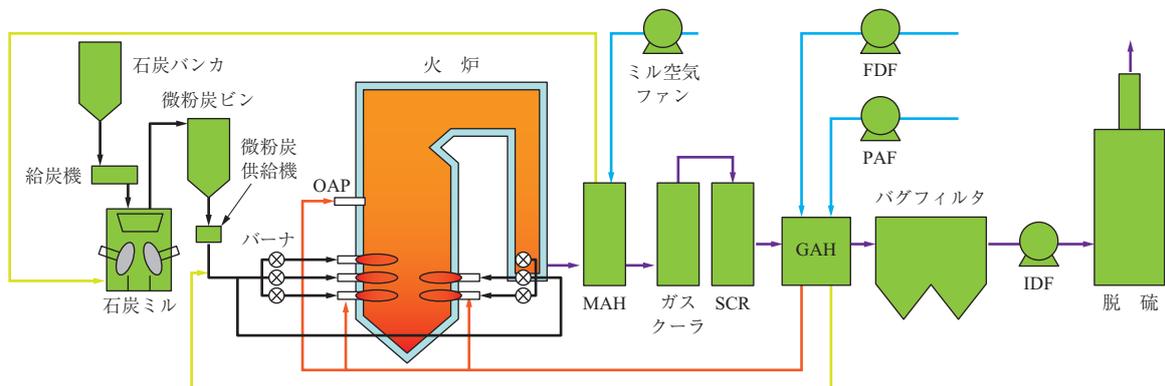
ペレット 50%超で炉内混焼した場合の火炉収熱を



第 19 図 ペレット混焼試験時の火炎の様子（実機）
 Fig. 19 Condition of flame in co-firing tests with wood pellets (Real machine actual power plant)

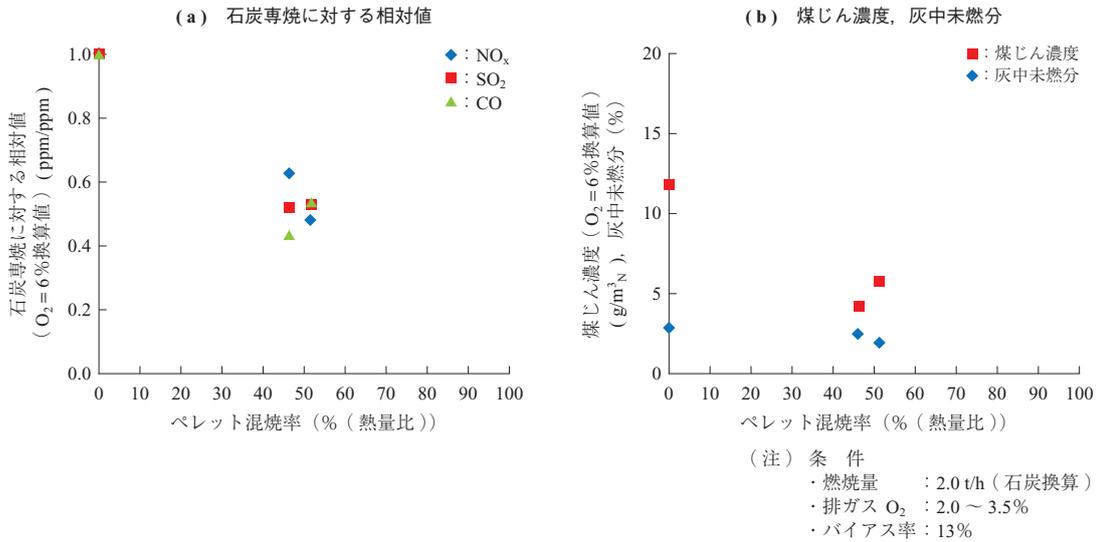
把握するため、マルチバーナ方式の燃焼試験炉で試験を実施した。第 20 図にマルチバーナ大型燃焼試験炉の概略系統図を示す。本試験炉では、事前に石炭を石炭ミルで粉碎して微粉炭ビンに貯蔵し、次に石炭ミルをペレットミルに改造した。ペレットはミルで粉碎して 3 段のバーナに供給し、微粉炭は微粉炭ビンから 2 段のバーナに供給して、石炭換算で 2.0 t/h の燃焼量に対し、ペレットを熱量比 50%超で炉内混焼した。

第 21 図に大型燃焼試験炉による混焼時の排ガス性状と灰中未燃分を示す。ペレットの S 分、N 分および灰分は少ないため、混焼時の NO_x、SO₂、CO、煤じん濃度は低下した。灰中未燃分は、ペレット混焼と石炭専焼とほぼ同等で、高比率混焼による影響はなかった。火炉収熱はペレット混焼の方が石炭専焼



(注) OAP : Over Air Port
 MAH : Mill Air Heater
 SCR : Selective Catalytic Reduction
 GAH : Gas Air Heater
 FDF : Forced Draft Fan
 PAF : Primary Air Fan
 IDF : Induced Draft Fan

第 20 図 マルチバーナ大型燃焼試験炉の概略系統図
 Fig. 20 Simplified block diagram of a large-scale multi-burner combustion test furnace

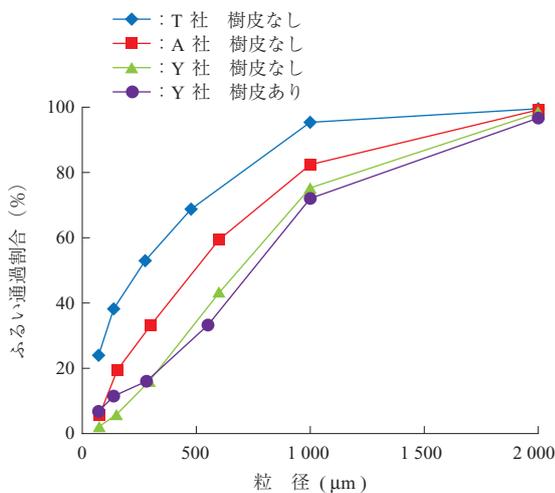


第 21 図 大型燃焼試験炉による混焼時の排ガス性状と灰中未燃分
 Fig. 21 Emission gas properties and unburned part of ash present in co-firing in large-scale combustion test furnace

に比べて高い傾向を示した。これは、ペレットの場合、多量の揮発分によって火炎が広がるため、火炉収熱が平均化するとともに、火炉全体での収熱が石炭専焼の場合に比べて増大傾向にあるためである。

(6) 燃料の影響の確認

各種ペレットの粉碎性の検討において、ペレットの製造業者や材料によって、粉碎生成物の粒径分布に違いがあることが確認されている。これによる燃焼性への影響を懸念して、複数種の国産ペレットを用いた単独粉碎・燃焼の要素試験を行った。この結果、粉碎生成物の粒径分布はペレット種によって異なることが分かった。第 22 図にペレット粉碎後の粒径分布 (供給量 : 1.5 t/h) を示す。燃焼試験では、



第 22 図 ペレット粉碎後の粒径分布 (供給量 : 1.5 t/h)
 Fig. 22 Particle size distribution of ground pulverized wood pellets (Supply amount : 1.5 t/h)

いずれのペレットも石炭バーナで専焼できることが確認された。第 23 図にペレット燃焼時のバーナ火炎の様子 (試験設備) を示す。このため今回の条件の粒径分布範囲であれば、ペレット粉碎生成物の専焼が可能であると考えられる。

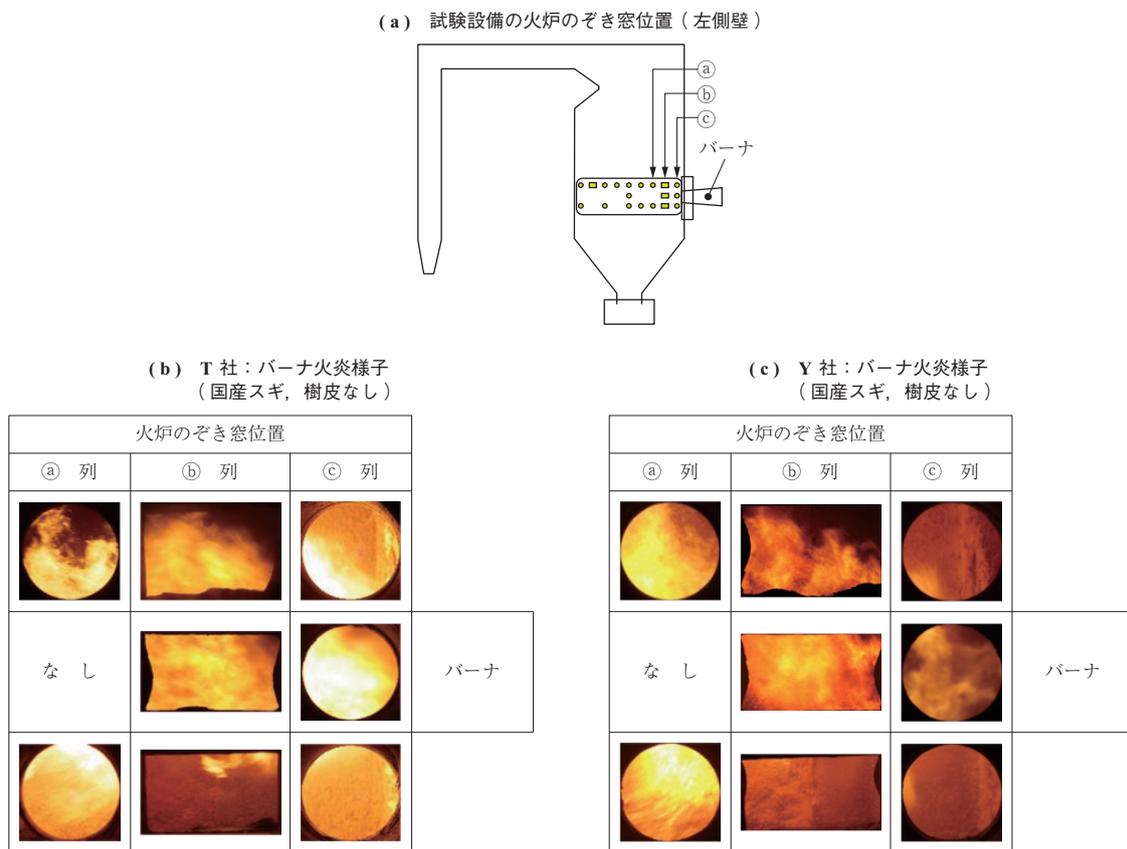
3.3 燃料供給システム

前述 2 章の課題である (1) 大量の安定継続的なバイオマス燃料需要の保証 (2) 採算可能な生産コスト (3) 安価な外材、違法伐採材の市場への混入、に対応するため、実証を重視した一連の試験、検討を行った。

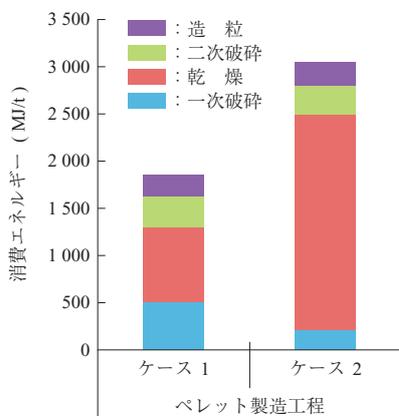
3.3.1 バイオマス加工、輸送システム

ペレット燃料を基準に、使用側と製造側の条件、エネルギー効率などを考慮した仕様候補を検討した。実際に燃料試作を行い、異なる製造工程での製造時のエネルギー消費量 (MJ/t) を計測、比較した。第 24 図にペレット製造時の消費エネルギー比較を示す。ケース 1 は予備乾燥した原料を用い、ケース 2 は生木を原料としている。これから製造加工法の選択によって燃料生産時の消費エネルギーに大きな開きができることが示された。

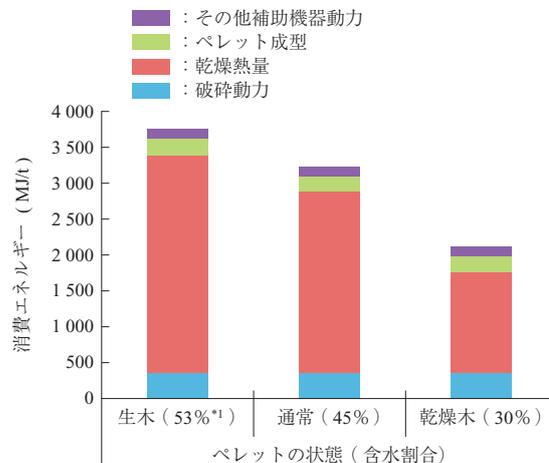
これらの結果を基に、バイオマスの加工・輸送に関わるエネルギー消費量を効果的に低減するための方策を検討した。このなかで最も重要な因子として原料木材の含水率に着目し、生木 (高含水原料) を原料に、原木からペレット製造までの加工エネルギーを計測、比較した。第 25 図にペレット製造時の消費エネルギー比較を示す。これらから含水率削減による効率への影響を燃料のマテリアルフロー (第 26 図) として表現し、これに後述の輸送エネ



第 23 図 ペレット燃焼時のバーナ火炎様子 (試験設備)
 Fig. 23 Photos of burner flame in co-firing of wood pellets (Coal combustion test facility)



第 24 図 ペレット製造時の消費エネルギー比較
 Fig. 24 Comparison of heat consumption in pellet production



第 25 図 ペレット製造時の消費エネルギー比較
 Fig. 25 Comparison of energy consumption in wood pellet production

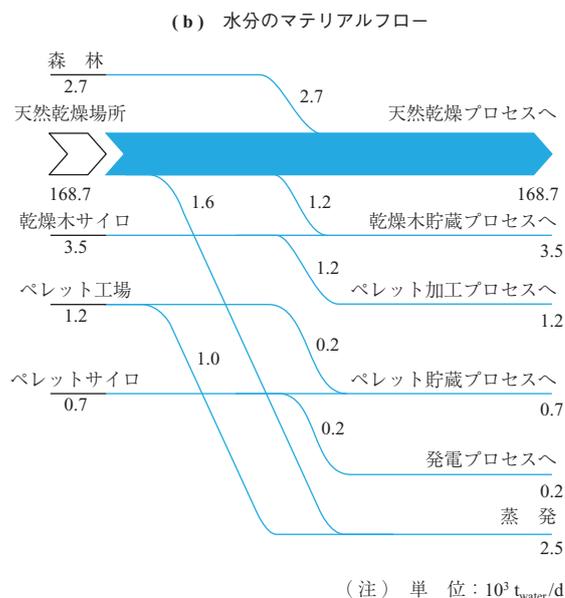
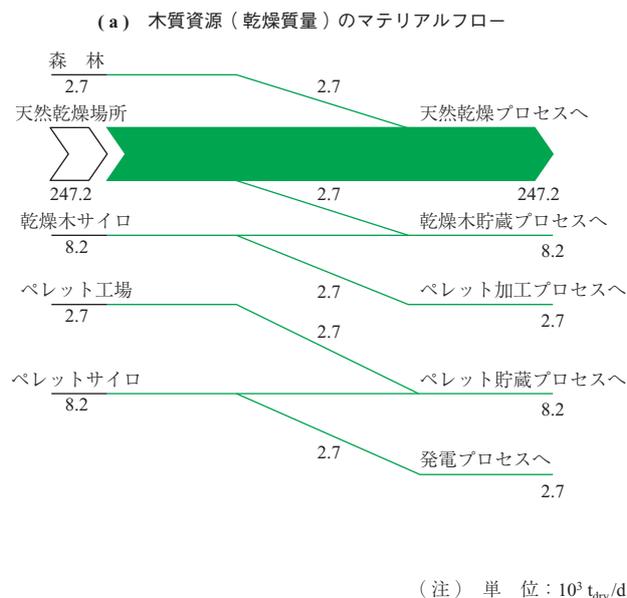
ルギーと併せて評価することにした。

3.3.2 バイオマス収集・輸送システム

前項で検討した燃料形態に適合する調達、加工、輸送方法 (広域収集を含む) を検討した。ここでも乾燥工程 (自然乾燥、人工乾燥など) に注目し、過去に実測したエネルギー消費量を基にエネルギー消費量を低減する収集・輸送システムを検討した。原木の自然乾燥を一定のレベルまで進めることによって、前項の結果と併せて数値シミュレーションにより、燃料エネルギーの 20% 以内の損失で

数百 km 圏内の資源利用が可能であるとの見通しが得られた。第 27 図に燃料収集範囲の解析結果を示す。

この結果の検証のため実証データ取得の一環として、要素試験用のバイオマス燃料の製造元 (福島県) から試験設備 (兵庫県) への実際の輸送作業を利用して、バイオマスの広域収集を想定した長距離輸送試験を実施した。トラック輸送 (直送)、トラック + 貨車 (コンテナ貨物)



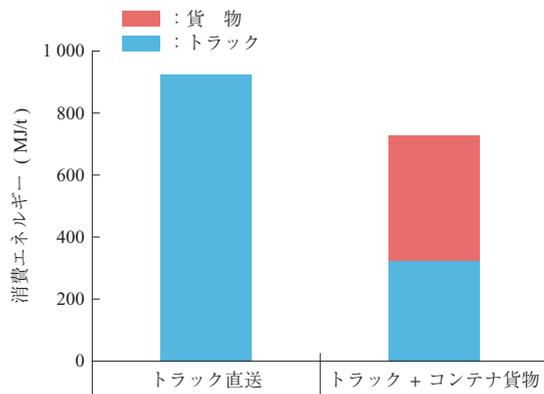
第 26 図 燃料の MATERIAL フロー
Fig. 26 Fuel material process



第 27 図 燃料収集範囲の解析
Fig. 27 Analysis of fuel collection range

輸送を同一発送地点、同一受取り地点間で実施することにより、エネルギー消費量を比較した結果、貨車輸送の有効性を確認した。第 28 図にペレット輸送時の消費エネルギー比較を示す。

一方、実際に大量の物量を輸送したことで、各輸送手段における種々の実用上の制約や問題も明らかになった。特に貨車輸送では、① 効率は良いが貨物積載ターミナルが少ない ② コンテナ接続数に制限がある ③ コンテナ形状の制約から積載容量が低いなど、トラック輸送にはない制約があることが分かった。さらに、燃料の積載効率向上のための特殊な形状のコンテナへの燃料充填試験なども試みた。

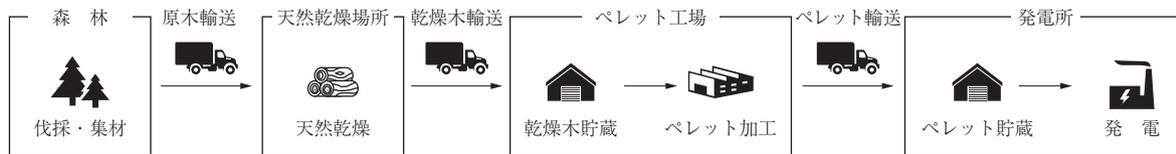


第 28 図 ペレット輸送時の消費エネルギー比較
Fig. 28 Comparison of energy consumption in wood pellet transportation

上記の要素試験結果を踏まえて、森林からバイオマス燃料に至るまでの複数のプロセスを一連のサプライチェーンとして捉えたロジスティクス・ネットワークを検討した。第 29 図にバイオマス燃料のサプライチェーンを示す。試算ではおよそ 40%（湿重量基準）以下の水分に低減すればバイオマス燃料のもつエネルギーの 20% 以内で発電所への大量輸送が可能との試算が得られ、これを基に計約 800 t のバイオマス輸送試験を実施した。

3.3.3 バイオマス持続的供給システム

森林の土壌は、樹木の育成すなわち持続的供給に重要な役割を占めるとともに、森林伐採の影響が森林の樹木そのもの以上に、森林の土壌に大量に含有されている有機物の挙動に影響を与えるかどうか温暖化防止の観点からは重要であると考えられる。本事業では、バイオマスの持続的



第 29 図 バイオマス燃料のサプライチェーン
Fig. 29 Supply chain for wood fuel

な供給維持の観点から極めて重要でありながら、従来ほとんど言及されることのなかった森林土壌に着目し、皆伐、間伐、搬出などの作業が森林とその土壌へ与える影響について前例のない広域評価を試みた。評価は土壌から発生する微量の温暖化ガス (CO₂, CH₄) の計測を中心に行った。測定には一般的なチャンバー法以外に、広域計測を想定して赤外線レーザーを用いた広域 CO₂ モニタリング計測法の森林内計測への適応性を検討した。2013 年度は千葉大学園芸学部構内で複数の計測法を実施し (第 30 図)、これらの要素試験を基に、最終年 (2015 年) 度は、実際の森林内での計測を実施した。第 31 図に森林内での CO₂ レーザモニタリング試験状況を示す。広域 CO₂ のレーザーモニタリングについては、精度はまだ低いものの、野外で

森林内の樹木を反射体とした測定が可能であることが確認され、二次元濃度マップなどの作成の可能性も示された。

さらに、2 列の列状間伐を行った作業場所での森林土壌への影響について、約 1 年間の継続土壌調査を実施した。第 32 図に列状間伐の現場と設置した自立型自動気象観測機器を示す。このような計測例がまだ少ないため、伐採作業の土壌への長期的影響は必ずしも明確ではないが、これまでの結果から日照の増加による下草の生育などの効果もあり、比較的伐採の影響は軽微ではないかと考えられる。第 33 図に伐採地点の土壌分析結果を示す。

この計測地には、明星電気株式会社が開発した太陽電池で稼働する自立型自動気象観測機器 (POTEKA Sta. 2) も設置し、森林内の気象データの計測に活用した。

(a) CO₂ レーザモニタリング試験状況



(b) 土壌放出ガス測定状況



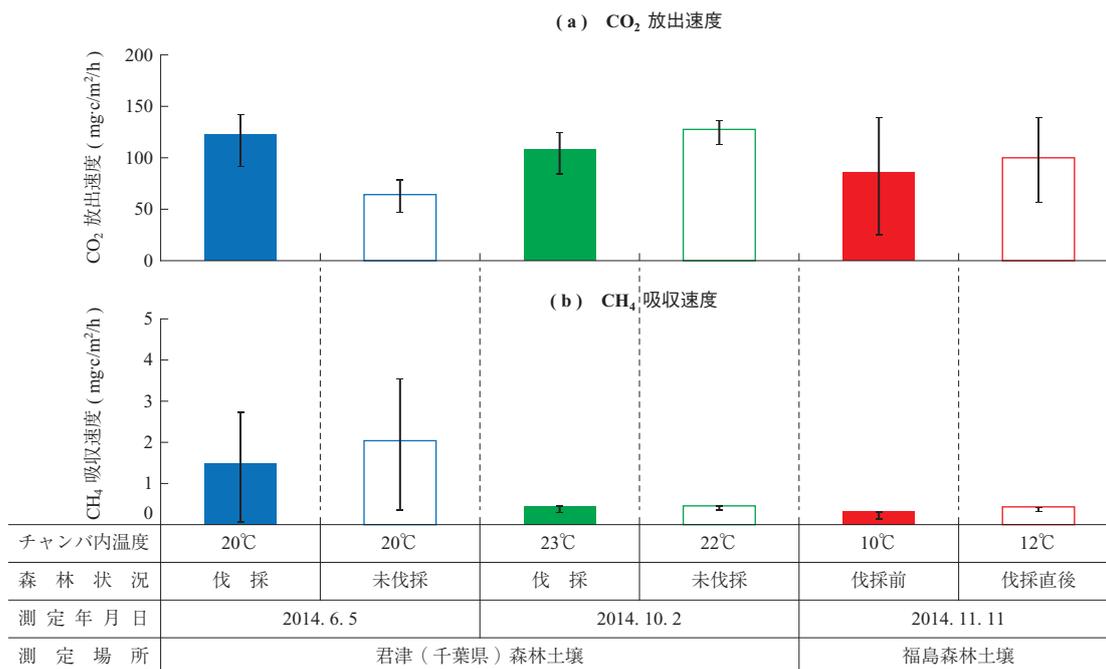
第 30 図 CO₂ モニタリング試験 (千葉大学園芸学部構内)
Fig. 30 CO₂ monitoring field test (at Faculty of Horticulture campus, Chiba University)



第 31 図 森林内での CO₂ レーザモニタリング試験
Fig. 31 CO₂ laser monitoring test in forest



第 32 図 列状間伐の現場と設置した自立型自動気象観測機器
Fig. 32 Line thinning at forest site and installation of stand-alone meteorological observation equipment



第 33 図 伐採地点の土壌分析結果
Fig. 33 Results of soil analysis in the logging field

3.3.4 バイオマス燃料のトレーサビリティ手法の検証

バイオマス燃料の原材料の出自を明確にすることを目的に、原材料バイオマスの産地、出材者などの識別を下流の流通、消費工程で簡便かつ確実にを行うための手段を検討した。まず最初に電波により非接触で情報が読取り可能な IC タグ（パッシブタイプ）適用を検討した。市販の IC タグから候補を数種選定し、これらを用いて、搬出、収集、加工状況を模擬した要素試験および野外試験を実施し、性能および耐久性、有効性を確認した。第 34 図に IC タグの計測試験および通信範囲の計測結果を示す。一連の試験結果から、現状の市販の IC タグでは運用性と特性が森林および木材のような水分の多い環境での使用には問題が多いことが分かった。

このため、簡便性やコストに優れるバーコード（一次

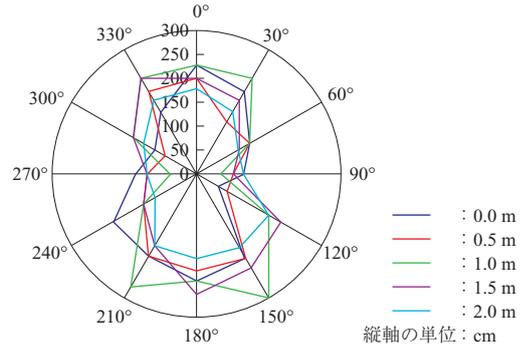
元）、QR コード（二次元）を使用して、同様に搬出、収集、加工時の利用状況を想定したデータ読取試験を実施し、運用性と特性が良好であることを確認した。第 35 図に QR コードの適用性評価を示す。

以上の結果を基に、さらに広域データの受渡しに関わるシステム構成などについても検討を行った。QR コードを用いた木材のトレーサビリティ試験を、一般に入手可能な市販機器のみから成るシステムを構築して実施した。試験では林業関係者も参加し、スマートフォンを用いた野外などでの読取りを実施し、有効に機能することが確認できた。第 36 図に QR コードを用いたトレーサビリティシステム試験実施状況を示す。これらの手法の一部はバイオマス供給実証試験にも適用し、問題なく運用できることを確認した。

(a) IC タグの計測試験



(b) 通信範囲の計測結果



第 34 図 IC タグの計測試験および通信範囲の計測結果

Fig. 34 Measurement results of IC tag measurement test and communication range

(a) 適用性評価

汚れ試験	読取画像 (QR コード)			
	評価内容	擦れ	泥	塗り
	評価結果	○	○	○
欠損 (折れ) 試験	読取画像 (QR コード)			
	評価内容	曲がり	折れ	凹凸
	評価結果	○	×	×
欠損 (破れ) 試験	読取画像 (QR コード)			
	評価内容	破れ 1	破れ 2	破れ
	評価結果	○	○	○

(注) QR コードサイズ: 5×5 cm

(b) 選定リーダ



- ・読取対応: 一次元, 二次元
- ・読取距離: 15 m

(c) ラベル装着状況



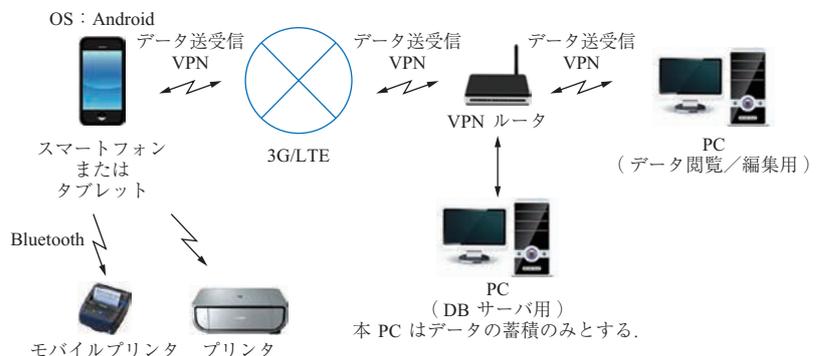
第 35 図 QR コードの適用性評価

Fig. 35 Applicability assessment for QR codes

(a) 市販スマートフォンによるラベル読取り



(b) データ管理システム構成



- (注)
- ⚡ : 無線通信
 - : 有線通信
 - VPN : Virtual Private Network
 - LTE : Long Term Evolution
 - DB : Data Base

第 36 図 QR コードを用いたトレーサビリティシステム試験実施状況

Fig. 36 Traceability system test using QR codes

3.3.5 バイオマス供給実証試験

第 37 図に森林での葉枯らし試験および野外乾燥試験を示す。燃料の大量供給試験（伐採、移送、乾燥、中間加工など）に先立ち、基礎データの取得を行うことを目的に、前述の千葉県君津市内の森林での葉枯らし（天然乾燥）試験（第 37 図 - (a)）に加えて千葉大学構内での野外乾燥試験（- (b)）を実施した。前述の自立型自動気象観測機器による計測も並行して実施し、長期間の含水率の変化を計測するとともに、乾燥に関わる因子とその影響を評価した。

この結果、おおよそ数か月から半年の乾燥期間をおけば、丸太の状態でも含水率は計画で設定した基準である 40%以下になることが分かった。第 38 図に伐採木の野外乾燥試験結果を示す。

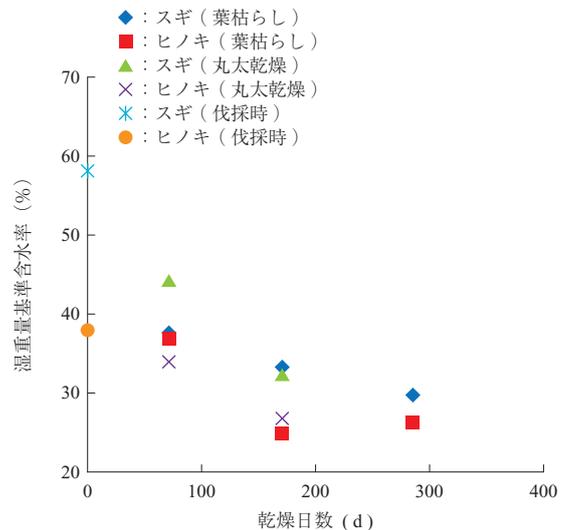
また、福島県内の国有林において作業路の敷設などを含む林業機械を用いた伐採および集材作業を実施し（第 39 図）、作業に関わるエネルギー消費を実測するとともに、大量集材時に予想される課題点の抽出・評価を行った。千葉県および福島県内で合計約 3 000 m³ の木材の伐採試験を実施し、これらの自然乾燥、収集、輸送と燃料への加工と輸送を行った。第 40 図に伐採試験現場および燃料搬入状況を示す。燃料は三つの工場で作製し、製造時のデータを計測するとともに、その一部を発電所に輸送した。

これらの一連の試験は、多数の団体および関係者の協力によって伐採から乾燥、加工など、約半年の期間にわたって実施され、国内からのバイオマス燃料の大量供給を実証することができた。一方、現状では収集、流通、各所において課題が多い点も明らかになった。

4. 成果のまとめ

4.1 バイオマス混焼ボイラシステム

微粉炭焚き火力発電所設備における前処理、貯蔵・搬



第 38 図 伐採木の野外乾燥試験結果
Fig. 38 Results of field drying test for logged wood

送、主機周辺など各システムの検討を行った。それに基づき実施した実証試験では、乾燥細粒チップとペレットで屋内貯蔵とトラック搬送、仮設を含むコンベヤ搬送を問題なく運用し、安全で安定した混焼試験が実施できた。

ボイラ性能データおよび環境データは、事前の予想どおり、バイオマスに由来するボイラ効率の若干の低下はあるが（0.5%以内）、環境基準に関わる NO_x、SO_x などの濃度が事前の予想どおりの低下を示すことが確認された。

ボイラ伝熱管に対する灰付着による伝熱阻害と腐食については、火炉で付着する灰、過熱器管領域で付着する灰を取得して組成を確認した。これを基にした模擬灰で腐食試験を実施した結果から、バーナゾーンの還元性雰囲気ではバイオマス混焼率の上昇によって、短期的には問題になるほどではないが、腐食量は石炭専焼時より若干増加する傾向が予想された。

4.2 バイオマス混焼燃焼システム

ペレットミルは、石炭比で 75%（熱量比）の粉碎ができることを目標に、縮流リング付きペレットミルを開発

(a) 葉枯らし試験



(b) 乾燥試験



第 37 図 森林での葉枯らし試験および野外乾燥試験
Fig. 37 Logging test and drying test



第 39 図 伐採および集材作業現場
Fig. 39 Logging test



第 40 図 伐採試験現場および燃料搬入状況
Fig. 40 Logging test site and fuel carry-in

し、試験設備および実証機において、石炭と同じ供給量を粉砕できることを確認した。バイオマスバーナとして従来の微粉炭バーナが使用可能なことを試験設備および実証機において確認した。火炉での 50%（熱量比）混焼は、入熱 20 MW・t/h クラスの試験設備で確認された。

以上の試験において混焼による排ガスや収熱への影響は大きくなく、ボイラに問題のないことが確認された。

4.3 バイオマス燃料供給システム

バイオマスの有効利用・加工、収集・輸送、持続的供給、トレーサビリティという各課題についての実証試験から、国産バイオマス供給ポテンシャルは、500 MW の微粉炭焚き火力発電所での 50%混焼の需要量を満たすことが、可能であることが実証された。

システム全体のエネルギー消費量をバイオマスのエネルギーの 20%以下とするには、原料木の含水率を湿重量基準で 30%以下とするなどの条件を達成することが重要で

ある。

国内のバイオマスの利用可能量は面積当たりの賦存量、成長量ともに欧米などと比較してもみても高い水準にあり、利用可能な輸送網も必ずしも低い水準ではないと思われる。効率的な林業機械を計画的に運用することで森林へのダメージを最小限にしながら継続的な伐採は可能と考えられる。

5. 普及に向けた今後の課題

本実証試験からは、多くの知見とともに以下の今後の課題を得た。

5.1 混焼ボイラシステム

(1) 高比率混焼時のバイオマス灰分のボイラへの長期的影響はまだ不明な点が多い。このため各地の微粉炭焚き発電所間でこれらの情報を収集、共有する仕組みが必要である。

- (2) バイオマスの大量利用時の貯蔵、搬送では粉じん発生、発熱、および長期使用時の摩耗などが懸念され、これらに対応する周辺機器、安全システムの開発検討が必要である。

5.2 燃焼システム

- (1) 今後、ペレット以外の多様な加工法、異種原料のバイオマス燃料の供給が予想される。それらに対して燃焼面、粉碎性などから系統的、実証的に検討する必要がある。
- (2) 上記に対応するため現行のミルよりさらに効率的、大容量の粉碎機構の開発が必要である。

5.3 燃料供給システム

- (1) 国内資源を有効かつ高効率で利用するため、① 森林の伐採と輸送 ② 乾燥を含む貯蔵 ③ ペレット製造および在庫 ④ 流通 ⑤ 発電所の需要、などを一体の市場として連動させることが必要である。
- (2) これらのシステムの構築には最新の ICT などの導入が必要である。
- (3) 国内森林資源の情報は上記のシステムを運用するには不十分な点が多い、国土の永続的な利用と保護の観点からリモートセンシングなど ICT を適用した、網羅的かつ正確な調査による現状把握が必要である。

6. 結 言

関係各位の協力によって、日本国内では未踏の領域であった商用火力での高比率混焼国内森林から商用発電所で

の混焼までのトータルシステムで国産バイオマスを用いて実証できた。この成果は今後の石炭火力における有力な温暖化対策であるバイオマス混焼の普及拡大に資するものと考えられる。

なお、本内容は、既設微粉炭火力発電への適用により大幅な CO₂ 排出削減や森林系バイオマスの導入拡大が期待できる先進的な取組みとして、一般財団法人新エネルギー財団より平成 28 年度新エネ大賞経済産業大臣賞を新日鐵住金株式会社と共同で受賞しました。

— 謝 辞 —

本研究は、多くの関係者のご協力と多くのご助言により実施されました。特に、新日鐵住金株式会社釜石製鉄所および全国森林組合連合会からは多大なご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 株式会社 IHI：石炭焚火力の CO₂ 排出原単位半減に向けたバイオマス高比率混焼技術の開発 成果報告書（平成 23 年－平成 24 年）地球温暖化対策技術開発・実証研究事業 株式会社 IHI 2014 年 1 月
- (2) 株式会社 IHI：バイオマス高比率混焼による石炭焚火力 CO₂ 排出原単位半減に向けた先進的システムの実証 成果報告書（平成 25 年－平成 27 年）CO₂ 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業