

MUCCトレファイドペレット®の開発

～ラボ試験から商業運転まで～

平岩友祐・中村敏明・林 茂也

当社が開発したトレファイドペレットは木質ペレットよりも耐水性と粉砕性を向上させた燃料であり、CO₂の排出量削減に向けて微粉炭火力発電所での混焼率の向上、それに伴う発電分野のバイオマス燃料の利用拡大が期待できる。当社が行ってきたトレファイドペレットの実験室規模の開発の結果、ペレット化後にトレファクションすれば、従来技術で問題であった耐水性を改善できることを見出し、パイロット試験での運転データを基に商業設備までスケールアップし、微粉炭火力発電所で使用できることを実証した。年間生産能力6万tonの商業設備を山口県宇部市に建設し、製造したトレファイドペレットを隣接する当社所有の216 MW微粉炭火力発電所にて使用したところ、粉砕性や燃焼性は良好でトレファイドペレットを用いた燃料転換の可能性が確認できた。

キーワード：バイオマス燃料、トレファイドペレット、ブラックペレット、PBT、石炭混焼、バイオマス専焼、燃料転換、トレファクション、半炭化

1 緒言

2012年に開始された再生可能エネルギー固定価格買取制度（FIT）により、2019年度のバイオマス発電設備導入量はFIT導入前に比べて約2倍となった⁽¹⁾。また、第6次エネルギー基本計画が2021年10月に閣議決定され、2030年度の再生可能エネルギーの発電電力量は3,360～3,530億kWh（電源構成比率36～38%）、そのうちバイオマスの発電電力量は約470億kWhと示された⁽²⁾。これは2019年度実績である262億kWh⁽³⁾の約2倍にあたる発電量であり、バイオマス発電事業者はさらなる発電量拡大に向けての対応が必要な状況にある。

バイオマス発電は木質ペレット（ホワイトペレット、以下WPと記す）が用いられていることが多いが、微粉炭火力発電所で石炭と混焼する場合は石炭との粉砕性が大きく異なるためにWPの混焼量は熱量比で3%程度が限界である⁽⁴⁾。さらにWPはその親水性のために雨水と接触すると膨潤して崩壊することからハンドリング設備にコストが掛かってしまうという課題もある。

上記課題の解決策として、当社ではトレファクション技術に注目し、トレファイドペレット（以下TPと記す）の開発を進めてきた。トレファクション（半

炭化）とはバイオマス固体を低酸素雰囲気中で約250～320℃で加熱したものと定義されており、粉砕性や単位重量当たりの発熱量が向上し、バイオマスが持つ親水性が疎水性に変化するとされている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

以上の背景として、当社では既設微粉炭火力発電所でのバイオマス混焼量を拡大させることを目的としてトレファクション技術に注目してきた。本稿では当社がこれまでにこなってきたラボ試験から商業設備までのトレファクションに関する技術開発の取り組み状況について紹介する。

2 プロセスの検討および基礎試験の評価結果

2.1 トレファクションプロセスの検討

従来のトレファクションプロセスとしては、木質チップを乾燥させ、その後トレファクションしてペレット化する工程が示されている。我々は上記工程で製造された複数社のTPを入手して耐水性の評価を行ったが、水中浸漬後24時間以内に原形をとどめずに崩壊してしまい、耐水性を見出すことができなかった。その解決策を検討する過程でTP製造プロセスを見直し、ペレット化後にトレファクションしてTPを試製したところ、水中浸漬後24時間を超えてもペレットの崩壊は起こらず耐水性が発現

することを見出した。これらの試験結果を踏まえ、我々は原料である木質チップを WP に成型してからトレファイドさせて TP を製造する工程を採用することとした。

2.2 樹種毎のトレファイドペレットの物性評価

トレファイドペレットの外観を図1に示す(商品名: MUCC トレファイドペレット®)。原料である WP は木材や製材残材の生産国・発生源で製造され世界に流通している。日本では国内産 WP の生産量は少なく、北米産もしくは東南アジア産の使用が一般的である。一方で樹種には地域特性があり、北米では針葉樹が主、東南アジアでは広葉樹が主となっており、同じ半炭化温度であっても TP の特性は樹種によって異なることが予想される。そこで我々は原料樹種が異なる WP を複数入手し、半炭化温度をパラメータとしてそれぞれの TP の固体収率、粉碎性、耐水性、自己発熱性を評価した(7)~(9)。TP は図2に示す内径 600 mm の電気加熱式バッチ炉に 4 kg の WP を投入し炉内温度計が所定の温度になるまで加熱して、その後試料を入れた容器ごと空気ファンにより急冷して製造した。表 1 に樹種の異なる WP 2 種と半炭化温度 230~280 °C の範囲で製造した TP 物性値を示す。

2.2.1 固体収率

半炭化温度を同じとした固体収率は、針葉樹のほ

うが広葉樹に比べて高かった。木材の熱分解過程においてその主要成分が最も盛んに熱分解する温度範囲は、ヘミセルロースでは 180~300 °C、セルロースでは 240~400 °C、リグニンでは 280~550 °C とされる(10)。表 1 に示した温度範囲での樹種による固体収率の違いは、原料である木質バイオマスを構成している上記成分のうち、最も低温で熱分解が始まるヘミセルロースの構成比率の違いが特に影響しているのではないかと推定している。

2.2.2 発熱量

発熱量は樹種に関係なく半炭化温度とともに上昇した。熱分解の進行とともに揮発分の中の酸素が減少して発熱量が上昇したためと考えられる。

2.2.3 粉碎性

粉碎性評価は、当社が開発した BMI (Ball Mill Index) を用いて行った。BMI の測定方法を以下に示す。JIS M4002 に示されている粉碎仕事指数評価用のボールミル(内径 305 mm, 長さ 305 mm)を用い、試料 700 cc をそのままの形状でボールミルに投入して回転数 70 rpm で 20 分間粉碎した後、粉碎後の試料を 150 μm の篩にかけ、篩下の粒子の重量割合を測定して BMI とした。BMI は石炭の粉碎し易さを表す代表的な指標である HGI (Hard Grobe Index, JIS M 8801 準拠)とは異なり、上述のとおり試料調製のための事前粉碎を行わないため、ペレッ

図1 MUCC トレファイドペレット®



図2 内径 600 mm 電気加熱式バッチ炉の外観



表1 各種木質ペレットとトレファイドペレットの物性比較

樹種	半炭化温度	固体収率	揮発分	固定炭素	高位発熱量	C	H	O	BMI	水中浸漬前後のDU比	自己発熱性試験 最高到達温度 ℃
	℃	%-dry	wt%-AD	wt%-AD	kcal/kg-dry	wt%-dry	wt%-dry	wt%-dry	-		
石炭(HV炭)	-	-	30.5	53.9	7,144	73.6	4.5	6.9	94	-	-
マツ類 (針葉樹)	-(WP)	100.0	75.8	12.7	4,794	51.2	5.4	42.6	13	-	143
	230	96.1	76.0	13.6	5,022	51.7	5.6	42.1	34	0.90	-
	250	90.0	74.5	17.3	5,140	53.8	5.3	40.3	71	0.98	149
	260	86.2	74.2	18.1	5,249	54.8	5.3	39.3	79	1.00	153
	270	80.4	72.1	21.3	5,452	56.2	5.3	37.9	88	1.00	164
アカシア (広葉樹)	280	75.1	69.2	24.0	5,565	57.8	5.3	36.2	93	1.00	≥200
	-(WP)	100.0	72.7	14.8	4,780	50.2	5.5	42.3	5	-	142
	230	94.0	74.5	16.5	5,001	52.0	5.5	40.8	26	0.99	147
	240	89.7	73.2	18.1	5,075	53.0	5.6	39.8	47	1.00	156
	250	85.7	72.1	20.2	5,225	54.6	5.5	38.2	73	1.01	156
260	80.1	69.5	22.9	5,342	56.0	5.5	36.7	88	1.01	≥200	

トから微粉となるまでの総括の粉砕速度を相対比較することができる。表1に示したとおり針葉樹、広葉樹ともにWPのBMIは20未満であり、表には示していないが微粉炭火力発電所で通常使用している石炭のBMI=95前後より大幅に低かった。一方、TPでは、半炭化温度の上昇に伴ってBMIは上昇し、石炭のBMIに近づいた。

2.2.4 耐水性

耐水性は、欧州規格 EN15210-1 に基づいて測定した機械的耐久性 (Mechanical Durability、以下 DU と記す) の水中浸漬前後の値を比較することによって評価した。屋外保管時に雨水にさらされたときに DU が低下するとハンドリング中の微粉割合が増えて発塵等が問題となる可能性があるため、水中浸漬前の DU (DU1) に対する 168 時間の水中浸漬後の DU (DU2) の比 (=DU2/DU1) が 1.00 以上で耐水性ありと評価した。ここで水中浸漬後の機械的耐久性は試料の表面水分を拭き取った後、恒温乾燥機中で 35℃で 22 時間乾燥させた後に測定した。表1に示したとおり、針葉樹では半炭化温度 260℃以上、広葉樹では半炭化温度 240℃以上で耐水性が発現することが分かった。

2.2.5 自己発熱性

自己発熱性は国際連合危険物輸送勧告関連試験 (以下、ワイヤーバスケット試験と記す)⁽¹⁾により評価した。ワイヤーバスケット試験とは一辺が 10 cm のステンレス網立方体の試料容器に試料を充填し、恒温槽内部に吊り下げ、140℃の温度で 24 時間連続して試料温度を測定し、200℃に到達するか否かを評価する試験であり、200℃以上となった場合は自己発熱性物質と判定される。自己発熱性物質と判定されると危険物となり、ばら積み貨物で輸送する際に消火設備や安全装置設置の制約を受ける他、陸上での保管においても安全管理の点からパイル内部の温度を監視する必要がある、ハンドリングが難しくなる。表1に各TPのワイヤーバスケット試験中の最高到達温度を示す。すべてのTPで半炭化温度の上昇とともに最高到達温度は上昇する傾向にあった。石炭では揮発分が大きな亜歴青炭や褐炭で自己発熱性の危険が増すが、バイオマスのトレファクションでは半炭化温度を上げて揮発分が減少した方が危険性は増した。これは熱分解の過程で揮発分の酸素が抜け、抜けた後が空気酸化し易い活性点

となったのではないかと推定している。TPが自己発熱性物質となる半炭化温度は、針葉樹で 280℃、広葉樹で 260℃となり、広葉樹の方が針葉樹よりも 20℃程度低い温度で自己発熱性を示した。

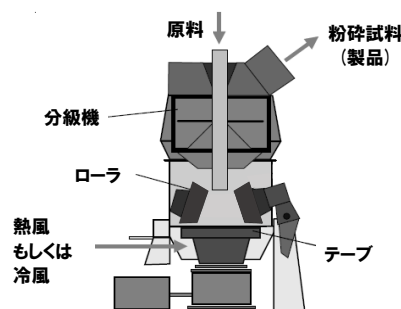


図3 縦型ローラーミルの模式図

2.3 小型縦型ミルを使用したTPの粉砕性比較

微粉炭火力発電所で使用されている粉砕装置と同じタイプである小型の縦型ローラーミル (以下ミルと記す) を使用して石炭とTPとの混合粉砕試験およびTPの単味粉砕試験を行った。使用した試験用のミルはUBEマシナリー株式会社製の型式UM3.6 (テーブル径 355mm) である。ミルの模式図を図3に示す。試験には石炭 (豪州ハンターバレー炭、BMI=94)、欧州アカマツのWP (BMI=18)、欧州アカマツのWPを半炭化温度 260℃で製造したTP (BMI=87) を使用した。

2.3.1 石炭との混合粉砕試験結果

バイオマス (TP もしくは WP) と石炭の混合粉砕試験を行い、ミル運転の安定性におよぼすバイオマス添加率の影響を評価した。一般的にバイオマスは石炭と比べて粉砕性が悪いため、石炭と混合粉砕した場合にはバイオマスがミル内部に設置されている回転式分級機を通過せずにミル内に戻され滞留する。これによりミル差圧 (ミルへ供給する一次空気の圧力損失) が上昇し、設備能力を超えて運転を継続できなくなる可能性がある。よって本試験では、ミル運転の安定性をミル差圧で評価した。運転条件を表2に示す。混合粉砕試験時はミル出口ガス温度が 70℃となるよう入口ガス温度を調整した。混合粉砕試験時の分級機回転数は、石炭単味粉砕における製品 (微粉炭) 粒度が 75 μm 篩上 20wt%以下となる 250 rpm とした。また、被粉砕物の総熱量としては、石炭 180 kg/h と同じ熱量一定の条件で行っ

表 2 混合粉砕運転条件

項目	単位	数値
石炭供給量(基準)	kg/h	180
ローラ面圧	MPa	6.5
テーブル回転数	rpm	69
分級機回転数	rpm	250
ミル入口ガス風量	m ³ /h	1,400

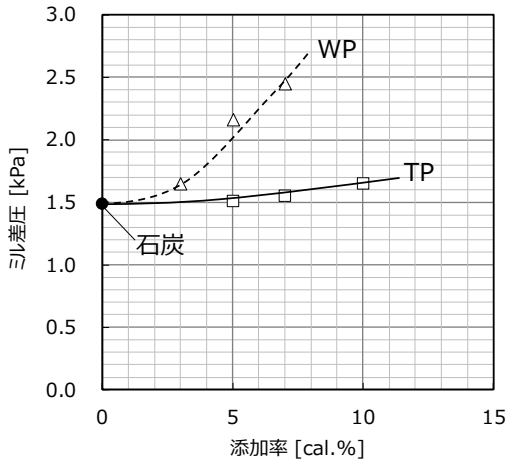


図 4 混合粉砕試験結果

た。試験結果を図 4 に示す。WP の添加では 3 cal.% の添加ですでにミル差圧は上昇し始め、添加率 5 cal.% では 2.2 kPa となり、WP を混合しない石炭単味粉砕時のミル差圧 1.5 kPa の約 50 % 増となった。この状態ではミルの安定運転は難しいと判断した。一方、TP と石炭との混合粉砕では、10 cal.% の添加でもミル差圧は 1.7 kPa であり、石炭単味粉砕時から 0.2 kPa の上昇にとどまった。TP 混焼時のミル差圧の上昇が小幅にとどまったのは TP の BMI が石炭に近づいたためであると考えられる。これらの結果から微粉炭火力発電所において TP を混焼すれば、課題となっている WP 混合粉砕時のミルの運転安定性を改善しバイオマス燃料の利用量を拡大することができると考えられる。

2.3.2 単味粉砕試験結果

石炭、TP、WP についてそれぞれの単味粉砕試験を行い、粉砕動力原単位 (kWh/ton) を比較した。TP と WP は高揮発分であるため単味粉砕試験は安全を考慮しミル入口ガスを冷風として行った。ここで、石炭については分級機回転数を 250 rpm とし製品 (粉砕物) 粒度が 75 μm 篩上 20 wt% 以下となる最大の粉砕量を試行錯誤により明らかにした。TP と WP については揮発分が高く石炭に比べて燃焼性は良好であり、更に WP は当社が山口県宇

表 3 単味粉砕試験結果

項目	単位	石炭	TP	WP
粉砕量	kg/h	223	281	108
風量	m ³ /h	1,400	1,400	1,400
ローラ面圧	MPa	6.5	6.5	6.5
テーブル回転数	rpm	69	69	69
分級機回転数	rpm	250	0	100
ミル差圧	kPa	1.65	1.21	1.73
製品 75 μm 篩上	wt%	18.5	-	-
製品 710 μm 篩上	wt%	-	1.78	19.9
中位径	μm	55	158	350
電力原単位	kWh/ton	6.6	6.7	17.3



図 5 PBT 宇部工場の外観

部市に保有する売電専用の 216 MW 微粉炭火力発電所 (以下 216MW 設備と記す) において 710 μm 篩上 20 wt% 以上の粒度まで燃焼性に問題がないことを確認している。そこで TP と WP については、両者の揮発分が近いことから燃焼性は同等であるとして、上記製品粒度を目標として分級機の回転数を調整しながら電力原単位が最小となるように粉砕量は試行錯誤により明らかにした。

試験結果を表 3 に示す。石炭単味粉砕では電力原単位は 6.6 kWh/ton であった。TP は石炭とほぼ同じ 6.7 kWh/ton であった。TP については分級機を停止しても製品の上記目標粒度を満足した。これは TP の粉砕性が向上したことによると思われる。WP では石炭および TP の約 3 倍の 17.3 kWh/ton となった。WP は粉砕性が悪いため粉砕量が低下していることが影響していると考えられる。これらの結果から同じ堅型ミルを使用するとした場合、WP に比べ TP の方が小さい電力原単位で多量に粉砕できると考えられる。

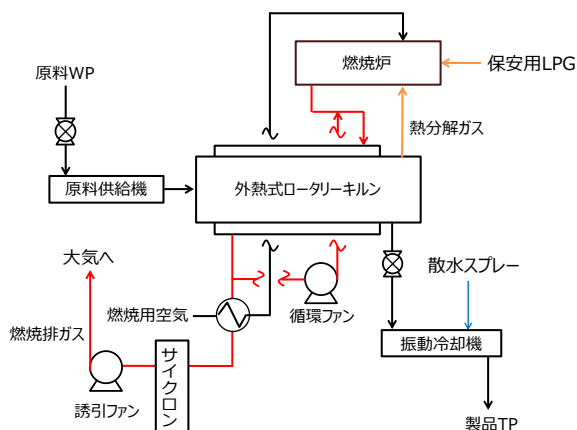


図6 製造プロセスの概要

3 TP製造商業設備および216MW設備での混焼状況

上記のとおりラボ規模からパイロット規模でTPの物性評価を進めてきたが、TPの利用を本格的に進めていくためには、商業規模におけるTP生産技術の確立と微粉炭火力発電所におけるTP混焼時の安定運転の実証が必要と考えた。そこで、我々は216MW設備におけるTP混焼量の目標値を6万ton/年(年間平均で約6cal.%)として、TP製造設備を山口県宇部市に建設することにした。TP製造設備は2018年4月に着工し2019年6月末に完工した。その後、試運転期間5ヵ月を経て2019年12月から商業運転を開始し、PBT宇部工場として現在も稼働中である。図5にPBT宇部工場の外観を示す。

3.1 TP製造プロセスの概要

図6にMUCCトレファイドペレット®製造プロセスの概要を示す。原料であるWPは原料供給機にて外熱式ロータリーキルンに定量供給され、間接加熱によりトレファクションされてTPとなる。ロータリーキルンから排出されたTPは冷却機に導入され冷却された後、ベルトコンベヤにより製品置場に搬送される。

トレファクションの過程でWPから発生した熱分解ガスは、燃烧炉に導入され完全燃烧した後にロータリーキルンの外熱ジャケットに入り、トレファクションの加熱用熱源として利用される。燃烧炉の熱源は99%以上がWPから発生する熱分解ガスとなっており、LPGは設備起動時の燃烧炉の昇温に使用する以外は失火防止の保安用としての数kg/hしか使用していない。

外熱ジャケットを出た燃烧ガスは一部を抽気して外熱ジャケット入口にリサイクルし直接熱回収

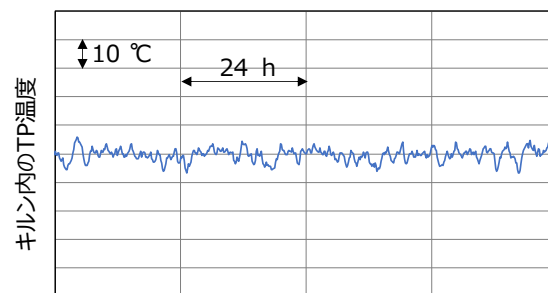


図7 ロータリーキルン内のTP温度トレンド

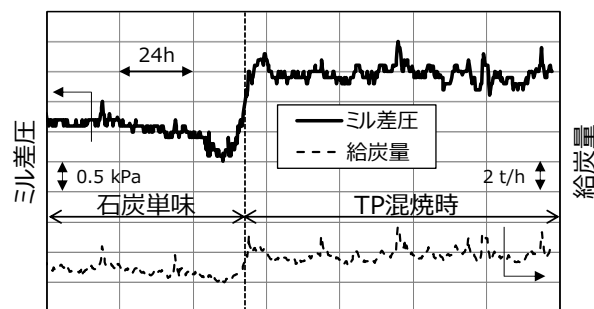


図8 216 MW 設備におけるTP混焼時のミル差圧トレンド

される。その後、熱交換器により燃烧用空気の予熱に利用された後、サイクロンにより燃烧ガス中のばいじんが除塵されて誘引ファンにより大気へ排出される。

3.2 TP製造商業設備の運転状況

図7に100%負荷で定常運転中のロータリーキルン内のTP温度トレンドを示す。前述のとおり、TP温度が一定となるよう外熱ジャケット入口温度を調整しているが、TP温度の変動は5°C以内であり、製品TPは十分に均質である。

3.3 微粉炭火力発電所でのTP混焼状況

TP製造設備から出荷されたTPは宇部コールセンター内で一定の割合でベルトコンベヤ上の石炭と混合された後、216MW設備で使用されている。図8にTPを約10cal.%で混焼した際の堅型ミル差圧のトレンドを示す。

TP混焼時のミル差圧は石炭単味粉碎時より上昇するものの管理値内で安定して推移した。6万ton/年のTPを混焼利用することにより、エネルギー起源のCO₂を約10万ton/年削減できる。

3.4 216MW設備でのTP単味粉碎・専焼試験

3.3項に記載した通り、TPは石炭との混焼におい

て10 cal.%の混焼比率で使用可能であることを216MW設備で確認した。一方、微粉炭火力発電所において将来的にカーボンニュートラルを実現するためには、石炭からバイオマス100%へ燃料転換(バイオマス専焼化)する必要があるが、TPはWPに比べ粉砕性が石炭により近づくため、発電所におけるミルやバーナ等において大規模な設備改造せずに燃料転換できる可能性が期待された。そこで、216MW設備においてTPを用いた燃料転換の可否を確認するために、2023年3月に単味粉砕・混焼試験を実施した。4台ある石炭ミルの内、1台のみ(1号ミル)をTP単味粉砕し、16本あるバーナの内、4本をTP専焼とした。図9に石炭およびTP専焼時のバーナ先端における火炎の状況(火炎は左から右方向)を示す。

TP専焼時の火炎の安定性は石炭専焼時と同等であり、燃焼性は良好だった。今回の試験は5日間の短期間ではあるが、設備改造は1号ミル周辺に安全装置を設置しただけでTP単味粉砕および専焼できることを確認した。

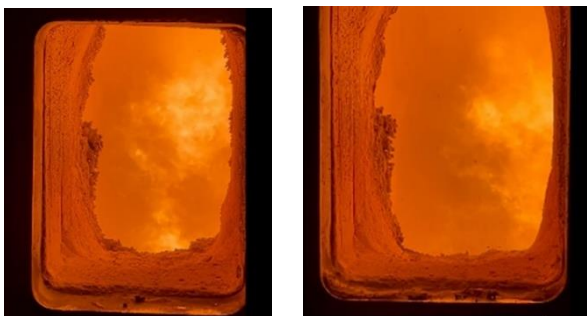


図9 バーナ先端における火炎の状況
(左: TP専焼、右: 石炭専焼)

4 今後の展望

PBT 宇部工場の設計・建設および商業運転によって得た生産技術を活用して、TP 製造設備の増設を検討している。2023年3月に実施した216MW設備でのTP単味粉砕・専焼試験ではTPを用いたバイオマスへの燃料転換の可能性が確認できたことから、当社の技術により生産したTPを用いて当該設備におけるバイオマス専焼化を実現させていきたい。また、国内の石炭火力発電事業者によるTP需要への供給を見据えて事業展開していくことで、脱炭素化に向けて貢献していきたい。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁、国内外の再生可能エネルギーの現状と今年度の調達価格等算定委員会の論点案、(2020年9月)
- (2) 経済産業省、エネルギー基本計画(素案)の概要、(2021年10月)
- (3) 経済産業省、2019年度エネルギー需要実績(速報)参考資料、(2020年11月)
- (4) 科学技術振興機構、
<http://www.jst.go.jp/sip/dl/k04/end/team3-21.pdf>
- (5) SECTOR、<http://sector-project.eu/about-SECTOR.3.0.html>
- (6) IEA Bioenergy Task32、
http://task32.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/2/2017/03/IEA_Bioenergy_T32_Torrefaction_update_2015b.pdf
- (7) 特許公報 特許第6648697号
- (8) 特許公報 特許第6501037号
- (9) 特許出願番号 特願2019-546693
- (10) 栗山旭、材料、16、772-776(1967)
- (11) 国際連合、危険物輸送に関する勧告 試験方法及び判定基準のマニュアル第5版、化学工業日報社、第三部33.3.1.6(2012)

平岩友祐・ひらいわ ゆうすけ
環境エネルギー事業部
エネルギー企画部
設計室 主査
(兼) 再生エネルギー事業推進室 主査

中村敏明・なかむら としあき
環境エネルギー事業部
エネルギー企画部
再生エネルギー事業推進室 室長
(兼) PBTプロジェクト室 室長

林 茂也・はやし しげや
地球環境対策プロジェクト サブリーダー
(兼) カーボンニュートラル技術推進室 室長