

もみ殻混焼バーナの開発

北野 裕樹・今田 雄司

Kitano Yuuki, Konta Yuji

概要

温室効果ガスであるCO₂の削減は、国際社会に課せられた喫緊の課題である。昨年10月に閣議決定された第6次エネルギー基本計画によれば2030年に向けて化石燃料の消費を削減し、カーボンニュートラルである再生可能エネルギーに代替して行くことが、温室効果ガスを2013年比で46%削減する有効な手段であるとしている。アスファルトプラントにおいても国の政策に歩調を合わせる形で温室効果ガス排出量の削減に精力的に取り組んで行く必要がある。そこで、日本国内全土において広範囲に行われている稲作で副産物として生成する「もみ殻」に着目し、これをアスファルトプラントの代替燃料として有効利用することを検討した。もみ殻は、バイオマス由来であることから燃焼してもカーボンニュートラルとなる。課題として、もみ殻を高温で燃焼すると人体に有害な結晶性シリカが析出することが知られている。このことから、材料試験において結晶性シリカが析出しない諸条件を特定し、実際のバーナ燃焼試験においてアスファルトプラント用燃料として適用が可能であることを検証している。本稿では、アスファルトプラントに適用可能なもみ殻混焼バーナの開発状況を報告する。

1. 緒言

2015年にCOP21 (Conference of Panel: 国連気候変動枠組条約第21回締約国会議) いわゆるパリ協定が成立し、2020年以降の地球温暖化対策の国際枠組みとして、温室効果ガス排出量の削減目標を定めることが義務付けられた。これを受けて、昨年(2021年)11月に英国のグラスゴーで開催されたCOP26において、我が国は、2030年までに温室効果ガスの排出量を2013年比で46%削減すること、そして、2050年までに温室効果ガス排出量を実質ゼロにすることを目標として宣言している¹⁾。これらの目標を達成するため、温室効果ガスの排出量を削減する優先すべき有力な技術として、太陽光・風力・地熱・水力・バイオマスといった再生可能エネルギーを利用する技術の普及を急いでいる。中でも、バイオマスは、エネルギー資源の観点では動植物資源とこれを起源とする廃棄物の総称であり、気象の変化や昼夜を問わず利用することが可能である。その中でも米どころで大量に発生し、有効利用が充分されていないもみ殻を化石燃料の代替燃料としてバーナで燃焼することに取り組んでいる²⁾。

日本の米の生産量は、減反政策と法改正の効果もあり1,052.7万t(2019年FAOSTAT³⁾より)と減産が続き米余り現象の解消に転じている。

一方で、収穫したもみは、乾燥・貯蔵・もみ殻除去・精米などの一連の操作を行う大型の農業施設であるカントリーエレベータに集積される。ここでは、もみの状態で乾燥を行い一旦貯蔵して、必要に応じてもみ殻を取り除いて玄米とし、これを精米して出荷している。この時に大量のもみ殻が生成している⁴⁾。米の収穫量に対する残さ発生率は湿重量で140%であり、残さに対する稲わらともみ殻の発生比率はそれぞれ湿重量で82.5%、17.5%という報告がある²⁾。上記の残さ発生率から2019年のもみ殻の発生量を算出すると、約258万tとなる。また、平成30年度のもみ殻の発生量は173.6万tという報告もある⁵⁾。米どころでは、田んぼを掘削してもみ殻を充填する排水用の暗渠としての利用に留まり、燃料としての熱利用はまだ限定的である。

もみ殻の発熱量は、およそ3,000kcal/kgである。重油の発熱量が8,800kcal/Lとすると、年間173.6万tのもみ殻をすべて重油の代替燃料として利用すると59,000万Lの重油と159.3万tのCO₂を削減することができる。

アスファルトプラント(以下、APと記述)では骨材の乾燥に主に重油を使用している。年間合材出荷量10万tのAPが消費する重油の量は約90万Lに上り、2,430tのCO₂を排出していることになる。APのバーナ燃料をもみ殻に代替したエネルギー代替率(以下、混焼率)を30%にした場合、年間約

27万Lの重油と729tのCO₂を削減することが可能である。混焼率が低ければ、日本国内のAPでは、もみ殻を使い切れない可能性があるため、他の燃焼機器でも使用することを検討する必要がある。

一方で、もみ殻をAP用燃料として有効利用することの課題として、もみ殻を高温で燃焼すると人体に有害な結晶性シリカが析出することが知られている。したがって、この結晶性シリカの析出を抑制することにより、もみ殻の燃焼灰をアスファルト合材に原材料の一部として混合して有効利用することが可能となる。このことより、材料試験において結晶性シリカが析出しない諸条件を特定し、実際のバーナ燃焼試験においてAP用燃料として適用が可能であることを検証している。本稿では、APに適用可能なもみ殻混焼バーナの開発状況を報告する。

2. もみ殻燃料

もみ殻は、70~75%がセルロースやヘミセルロースなどを含む有機成分、約15~20%がシリカ(SiO₂)、残りは水分と金属である。もみ殻に僅かに含まれたアルカリ金属により、シリカが複合酸化物(NaSiO₃, K₂SiO₃)を生成し、融点が1,986K(SiO₂)⁶⁾から1,110K⁷⁾、1,249K⁷⁾などに低下(共晶反応)し、局所的に熔融する。熔融したシリカに有機成分からの炭素が取り込まれることにより、シリカの純度低下、黒色化が発生する。また、熔融シリカが凝固する過程において結晶性シリカが生成する^{7,8,9)}。結晶性シリカはアスベストと同様に人体への発癌性の恐れ有り(グループI)に区分されている。そのため混焼バーナの燃料としてもみ殻を使用するためには、結晶性シリカを析出させずに熱量を取り出すことが重要となる。

もみ殻を燃料として使用するために分析を行った。もみ殻をバーナで燃焼させる際に貯蔵、圧送、燃焼というプロセスがあるため、貯蔵時のアーチングや粉塵爆発の危険がないか予め分析する¹⁰⁾。図2-1にもみ殻粉砕燃料を示す。バーナ試験で用いたもみ殻燃料は、秋田県で発生したもみ殻を700~900μmに粉砕したものである。粉砕したもみ殻燃料の粒径分布を表2-1に示す。表2-2に工業分析結果を示す。炭素分が約4割含まれており、微量の硫黄、塩素も含まれる。表2-3にJIS Z8817の粉塵爆発測定の結果を示す。測定の結果、「爆発の激しさが弱い」という分類になったので、貯蔵時には着火源が発生しないように注意が必要である。



図2-1. もみ殻燃料

表2-1. もみ殻燃料粒径分布

含水率	9.96 %		
粒子径(D80)	764 μm		
フルイ目の寸法(mm)	篩分率 (%)	網上率 (%)	網下率 (%)
2	0.00	0.00	100.00
1	0.98	0.98	99.02
0.5	40.20	41.18	58.82
0.25	32.35	73.53	26.47
0.15	11.76	85.29	14.71
0.106	3.92	89.22	10.78
0.075	2.94	92.16	7.84
0.053	1.96	94.12	5.88
0.053以下	5.88	100.00	0.00
合計	100.0		

表2-2. もみ殻燃料成分分析結果

分析対象	単位	分析結果	定量下限	分析方法
炭素	w %	39.4	0.1	JIS M 8819 (1997)
水素	w %	5.1	0.1	JIS M 8819 (1997)
窒素	w %	0.56	0.01	JIS M 8819 (1997)
酸素	w %	34.64	-	計算
全硫黄	w %	0.04	0.01	燃焼-イオンクロマトグラフ法
全塩素	w %	0.05	0.01	燃焼-イオンクロマトグラフ法

表2-3. もみ殻燃料粉塵爆発測定結果

項目	結果
最大爆発圧力	6.3 × 10 ² kPa
最大爆発圧力上昇速度	172 × 10 ² kPa/s
爆発指数	53 × 10 ² kPa m/s
爆破クラス	1

3.材料試験

3.1 材料試験の目的

材料試験の目的は人体に有害な結晶性シリカの発生を抑制できる加熱条件を確認することである。材料試験では管状炉を用いて、温度、加熱時間の条件を変更して行った。

3.2 管状炉

試験で使用した管状炉を写真3-1に示す。管状炉はAS ONE製のTMF-700Nを使用した。管状炉は電気ヒータによって、セラミック製の管を加熱する。管の内部に被加熱物を設置して、温度制御を行いながら加熱を行う。管には任意の気体を流すことが可能である。

管状炉試験では目標温度(800℃,900℃,1,000℃)に管を加熱した後、セラミック製の皿に乗せた材料を管に入れて、目標時間(30分,60分,120分,180分,240分)経過後取り出した。管内部は大気雰囲気で行った。



写真3-1. 管状炉

3.3 材料試験結果

3.3.1 温度、加熱時間の効果

図3-1に800℃で加熱時間を変えた灰を示す。加熱時間が長いほど灰が白くなることが確認された。これはもみ殻に含まれる炭素分が加熱により徐々に取り除かれていったためと考えられる。

また、図3-2に加熱時間30分で温度を変えた灰を示す。温度が高くなるにつれて黒くなる傾向が見られた。温度が高いほど、シリカが熔融し、熔融したシリカに炭素分が取り込まれて黒くなることが推測される。



図3-1. もみ殻加熱試験結果(800℃)

3.3.2 二段燃焼の効果

もみ殻を一度加熱後、再度加熱した二段燃焼試験を実施した。温度と加熱時間を変えて二段燃焼することにより、色の変化と結晶性シリカ析出の有無を確認した。800℃→1,000℃の二段燃焼の結果を図3-3に示す。図より、1,000℃の加熱時間が長いほど白くなる傾向が得られた。その中で、800℃5分、1,000℃30分の条件が最も白くなった。

800℃→1,000℃の灰のX線分析結果を図3-4に示す。図より、X線分析では結晶性シリカが存在すると約22degの位置に鋭いピークが検出される。二段目の1,000℃5分では結晶性シリカは検出されず、1,000℃10分以上では結晶性シリカのピークが検出された。このことから、800℃では30分加熱しても結晶性シリカが発生しないことが推測される。井上らの報告によると、500℃で2時間加熱後、800℃で6時間加熱するとクリスタライトが発生すると述べている¹⁾。

3.4 材料試験結果まとめ

- ・各種設備に適用するために、燃焼による結晶性シリカの抑制と灰の色の確認を行った。
- ・1000℃10分以上加熱すると結晶性シリカが発生する。
- ・800℃30分加熱しても結晶性シリカは発生しない。
- ・二段燃焼を行うと灰が白くなる。

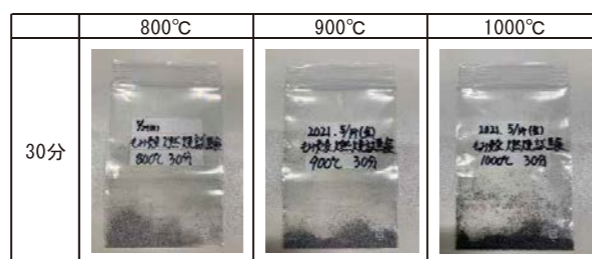


図3-2. もみ殻加熱試験結果(30分)

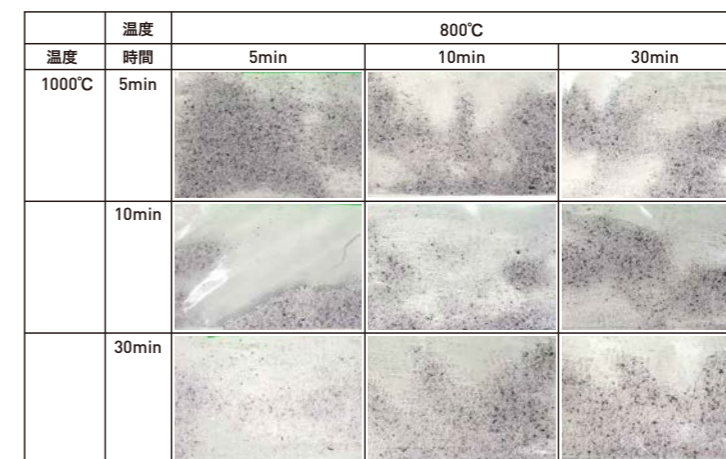


図3-3. 粉碎もみ殻二段燃焼 800℃→1000℃ 写真まとめ

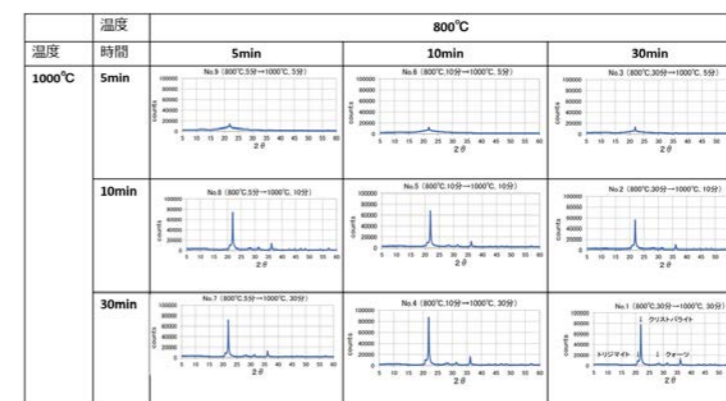


図3-4. 粉碎もみ殻二段燃焼 800℃→1000℃ X線分析結果

4.バーナ試験

4.1 バーナ試験の目的

もみ殻燃料を重油と混焼することにより、化石燃料の消費量を削減することを目的とする。そして、実際のバーナでもみ殻燃料を燃焼させることにより、材料試験結果との比較を行う。具体的には、粉体から熱量が得られるか、排ガスに有害物質が含まれないか、粉塵に結晶性シリカが含まれないかを確認する。

4.1 試験設備

図4-1は、社内に設置している粉体バーナの試験設備のフローである。図より、Aはもみ殻混焼バーナ、Bは燃焼炉、Cは第一煙道、Dはサイクロン、Eは第二煙道、Fは排ガス冷却塔、Gはバグフィルタ、Hは排風機である。Cに設置しているT6は、炉出口温度であり、主な評価をこの温度を用いて行う。同様の位置にて燃焼炉から飛んできたダストをサンプリングする。APにこのバーナを設置する場合、燃焼室出口が骨

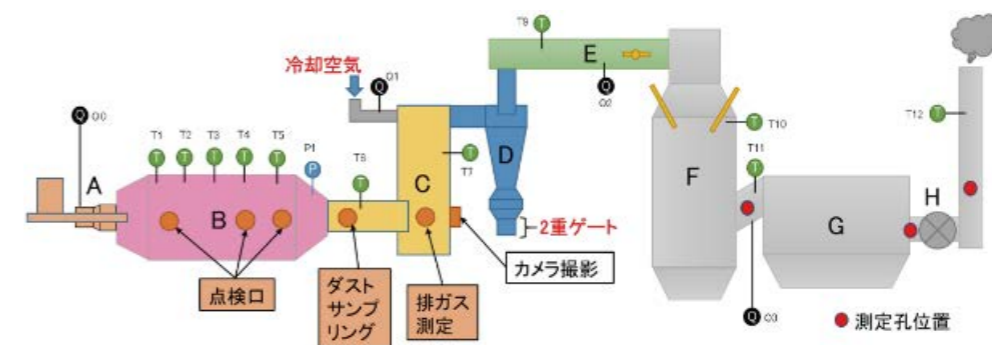


図4-1. 社内試験設備フロー図

材ドライヤのバーナ接続口となるため、ここでサンプリングされたダストが骨材に混入することを想定している。

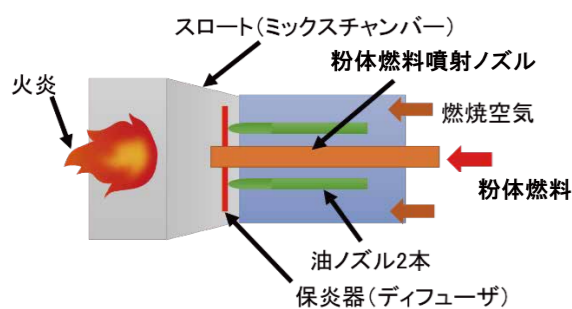


図4-2. 粉体バーナ模式図

り、アーチングしやすい高含水の粉体でも供給可能である。粉体ホッパ下部には、粉体の切り出し流量調整のためにスクリュが組み込まれており、インバータにより回転数制御されている。さらに、スクリュの下流には圧送空気の逆流を防止するためにロータリーバルブが設置されている。そして、ロータリーバルブの下流には粉体圧送配管が接続されており、粉体圧送用ブロワからの送風により粉体噴射ノズルに粉体燃料を送り込んでいる。粉体圧送用のブロワは配管内の風速が適切になるようにインバータで回転数制御を行っている。配管内の風速は常にピトー管で監視しており、風速が急激に減少すると閉塞が発生したと判断できる。

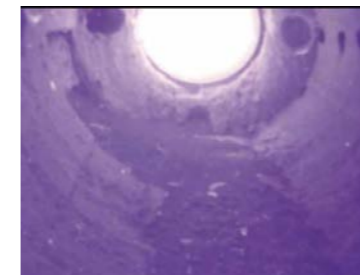


写真4-3. 運転中燃焼炉内



写真4-4. 運転後燃焼炉内

材料試験より、1000℃10分以上の雰囲気中で結晶性シリカが発生しており、また文献より800℃6時間以上で結晶性シリカが発生していることから、炉内の灰は上記のように結晶性シリカが発生する雰囲気であったことが推測される。

高温、長時間滞留により結晶性シリカが発生するので、炉内の滞留をなくすために写真4-2のようにブローアップ設備を設置し、試験を行った。

写真4-5にバーナ試験中に燃焼炉の3ヶ所でブローアップをした炉内を示す。ブローアップの位置を1ヶ所にした場合、ブローアップをしていない位置に灰が堆積することが確認された。3ヶ所ブローアップすることにより、炉内の堆積をなくすことができた。

図4-5にブローアップ設置後の燃焼炉出口のダストのX線分析結果を示す。ブローアップ設置後のダストに結晶性シリカが含まれていないことが確認できた。ブローアップ設備の設置により、結晶性シリカを発生させずに燃焼することが可能となった。



写真4-1. 粉体バーナ試験機



写真4-2. 燃焼炉

4.2 粉体バーナ

粉体バーナの模式図を図4-2に、同バーナの全景を写真4-1に示す。

図より、粉体バーナは、2本の重油噴霧ノズルと中心部に位置する1本の粉体噴射ノズルから構成されている。そして、重油噴霧ノズルにより形成される火炎に粉体噴射ノズルからの粉体燃料を空気圧送し混焼させている。また、粉体燃料は、粉体圧送配管の途中で圧縮空気を円筒断面の接続方向から吹き込むことによって強力な旋回流を発生させ、これにより粉体燃料を分散噴射させて燃焼しやすくしている。また、同粉体バーナの全長を短くするために、燃焼用空気をバーナ横側より90°曲げて導入している。このため、偏流が生じないように燃焼用空気のダクト内部には整流板を設置している。社内試験設備での重油の最大燃焼量は200L/hであるが、ノズルを変えることにより最大燃焼量を変更することが可能である。

一方、当該粉体バーナ試験機は、粉体燃料を定量供給するための粉体燃料供給装置を併設しており、粉体ホッパ、切り出し用スクリュ、ロータリーバルブ、圧送装置などから構成されている。粉体ホッパは、燃料の性状に応じて、アーチングを防止するための攪拌機を備えている。この攪拌機によ

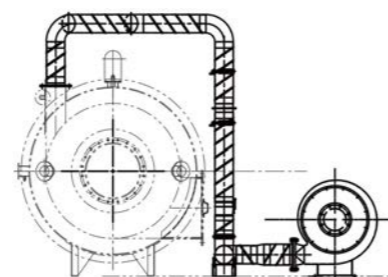


図4-3. ブローアップ装置

4.3 燃焼炉

試験で使用した燃焼炉を写真4-2に示す。同燃焼炉は、粉体燃料を完全燃焼させるのに必要な温度と滞留時間とを確保するために設置している。そして、燃焼炉の寸法は、φ1,600×L3,100の円筒構造とし、内面には耐火キャストブルを150mm厚さで施工している。炉内には、燃焼ガスの温度分布を確認するために熱電対を5本設置している。また、炉内に滞留した灰から結晶性シリカが析出するのを防止するためにブローアップ設備を設置して灰を吹き飛ばしている。図4-3にブローアップ設備を示す。ブローアップは炉の前方、中央、後方の3ヶ所に設置しており、ブローアップ風が燃焼炉の円周方向から入るようにしている。また、必要に応じて炉内にカメラを挿入して動画を撮影できるようにしている。

4.4 バーナ試験結果

4.4.1 燃焼炉ブローアップ試験

写真4-3に混焼率30%(重油105L/h、もみ殻燃料132kg/h)で試験した際の炉内を示す。写真4-4に試験終了後の炉内を示す。

写真4-3の中央上部がバーナであり、運転中にバーナ左下に灰が堆積していることが確認される。写真4-4より、試験終了後に炉内に灰が堆積していることが確認できた。

図4-4に粉体バーナにおいて混焼率30%で試験した際のダストのX線分析結果を示す。炉内滞留物は燃焼試験終了後に採取し、灰サンプルは燃焼炉出口にて試験中にサンプリングした。炉内滞留物で結晶性シリカが検出され、燃焼炉出口で試験中にサンプリングしたダストには検出されなかった。この結果より、高温領域に短時間滞留した場合は結晶性シリカが発生せず、炉内に長時間滞留すると結晶性シリカが発生することが確認できた。

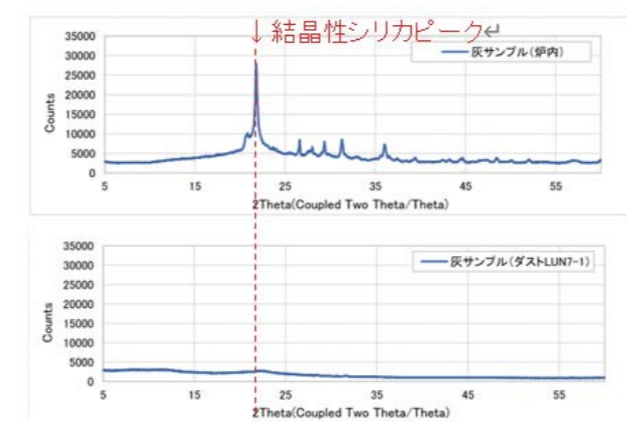


図4-4. バーナ燃焼灰X線分析結果 (上: 炉内滞留物, 下: 炉出口サンプリングダスト)



写真4-5. ブローアップ運転中燃焼炉内

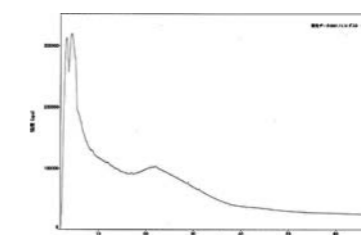


図4-5. ブローアップダストX線分析結果

4.4.2 炉出口温度によるダスト性状

前述の燃焼炉のブローアップを過剰に行う場合や、バーナ空気比が高い場合、また予熱が足りない場合は炉出口温度が低くなる。炉出口温度が低いときに混焼試験を開始すると、もみ殻の熱分解が充分でないダストが発生する。

写真4-6に炉出口温度が異なる条件でサンプリングしたダストを示す。写真の左は混焼率50%であり、炉出口温度が930℃程度でサンプリングしたものであるが、写真の右は混焼率70%で炉出口温度が870℃程度でサンプリングしたも

のである。炉出口温度が低い場合、燃焼前のもみ殻に近い色になっており、温度が高くなるにつれて黒くなる。炉出口温度が低い場合、ダストに有機分が残っているのもみ殻から熱量が得られていないことが推測される。

炉内温度を上げるためにバーナの熱量を増加した試験を行った。図4-6に混焼率を変えずにバーナ出力を1500kWから1670kWに増加した試験のトレンドグラフを示す。バーナの熱量を上げると問題なく炉出口温度が上がる事が確認された。



写真4-6. サンプル温度の違い (左930°C,右870°C)

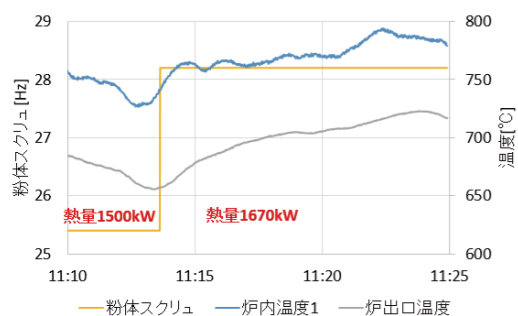


図4-6. 温度トレンドグラフ (混焼率70% 熱量1500kW→1670kW)

4.4.3 混焼率を変えた試験

混焼率50,70%にて試験を行った。各条件のトレンドグラフを図4-7に示す。

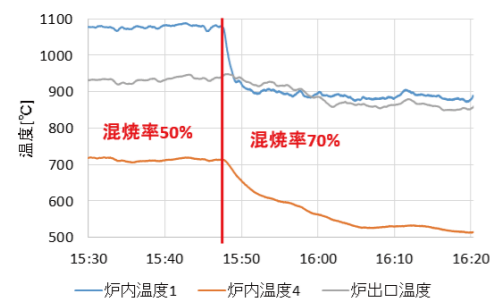


図4-7. 温度トレンドグラフ (混焼率50%→70%)

総熱量を変えずに混焼率を50%から70%に増加させると炉内温度が約200°C低下し、炉出口温度は約50°C低下した。総熱量は変わっていないので、混焼率を70%にすることで燃焼効率が低下している。この場合、前述のように混焼率一定のまま熱量を増加(重油ともみ殻燃料を増加)させると混焼率50%と同様の温度になるため、運用上問題ないと判断する。

混焼率50%,70%で試験を行った際の炉出口でサンプリングしたダストのX線分析結果を図4-8に示す。各条件とも結晶性シリカは検出されなかった。これらの結果より、混焼率70%までは結晶性シリカを発生させずに運用可能であると考えられる。

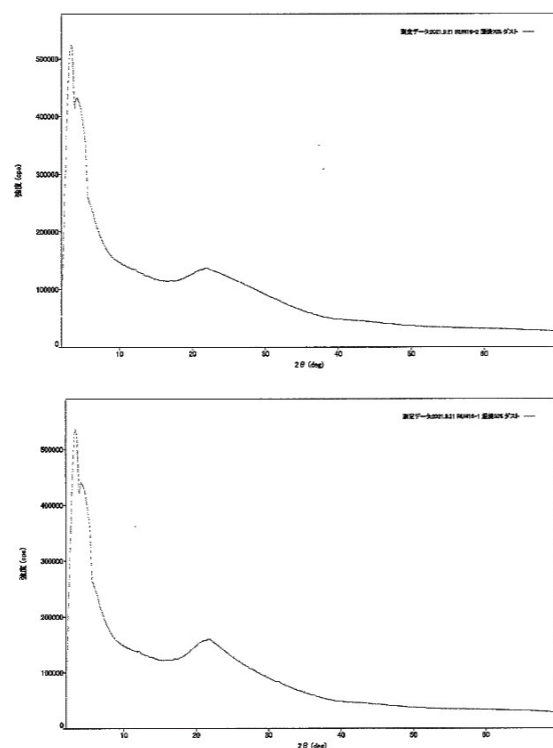


図4-8. X線分析結果 (上 混焼率50%, 下 混焼率70%)

4.4.4 バーナ試験結果まとめ

- ・重油200L/hクラスの混焼バーナでA重油ともみ殻燃料の混焼試験を行った。
- ・燃焼炉に堆積したダストからは結晶性シリカが検出されたため、ブローアップ設備を設置して、燃焼炉内にダストが堆積しないようにし、結晶性シリカの発生を抑制した。
- ・混焼率30%,50%,70%のそれぞれで結晶性シリカが発生しないことを確認した。
- ・混焼率を70%まで上げると炉内温度が低下するが、熱量を増やすことにより温度維持が可能であることを確認した。

5.総括

- ・日本で多く発生し、未利用のもみ殻を熱源としたバーナを開発した。
- ・材料試験にて温度、時間を変更して加熱し、結晶性シリカが発生する条件(1,000°C10分以上加熱)を推定した。
- ・バーナ試験にて燃焼炉にブローアップ設備を設置することにより、高温長時間滞留にて発生する結晶性シリカを抑制した。
- ・混焼率30%, 50%, 70%での燃焼炉出口ダストをサンプリングし、結晶性シリカが発生していないことを確認した。

References

1. 外務省
https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000121.html.
2. 社団法人 日本エネルギー学会: バイオマスハンドブック 第2版, オーム社, (2009).
3. FAO STAT 2019, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
4. 社団法人 化学工学会, 日本エネルギー学会: バイオマスプロセスハンドブック, オーム社, (2012).
5. 環境省環境再生・資源循環局 令和2年度 廃棄物の広域移動対策検討調査及び廃棄物等循環利用量実態調査報告書 (廃棄物等循環利用量実態調査編) (http://www.env.go.jp/recycle/report/R02%E5%BE%AA%E7%92%B0%E5%88%A9%E7%94%A8%E9%87%8F%E5%A0%B1%E5%91%8A%E6%9B%B8_%E6%9C%AC%E7%B7%A8.pdf) (2021).
6. 化学大辞典編集委員会, 化学大辞典6縮刷版, (1972)
7. 梅田 純子ら, 農作物非食部バイオマスから高純度非晶質シリカの抽出プロセスとコンクリート用混和剤としての利活用, (2014)
8. 関藤 良子ら, Solubility and physical composition of rice husk ash silica as a function of calcination temperature and duration, International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture (2021)10:19-27
9. 梅田 純子ら, High-purity amorphous silica originated in rice husks via carboxylic acid leaching process, J Mater Sci (2008) 43 : 7084-7090

10. (社)日本粉体工業技術協会粉塵爆発委員会編, 粉じん爆発火災対策, オーム社 (2006)
11. 井上耕三ら, もみがら灰の加熱条件とその性状, 無機マテリアル, Vol.3, Jul.312-318 (1996)

筆者紹介



KITANO Yuuki
北野 裕樹
2015年入社
開発部 開発1課



KONTA Yuji
今田 雄司
2002年入社
開発部 開発1課