

籾殻燃焼による熱供給に適した燃焼炉の検討

国内外の燃焼炉メーカーにおける燃焼試験

頼泰樹^{1*}, 河端美玖^{1*}

¹ 秋田県立大学 生物資源科学部 生物生産学科

※両著者の本論文に対する貢献度は同等である

国内で生じる籾殻の 25%は、未利用のまま廃棄されている。この籾殻をバイオマス燃料として熱供給や発電に活用することが試みられている。しかし、籾殻にはケイ素が 20%含まれ、高温で燃焼させると、そのケイ素分が発がん性物質の結晶性シリカに変化し、燃焼灰として排出される。また、燃焼炉内でも結晶性シリカが固化したクリンカが形成され、炉の運転にも支障をきたす。本研究は、籾殻の燃料利用の課題を明確にするため、国内外のボイラーで籾殻の燃焼試験を行った。国内外の 5 基のボイラーで籾殻の燃焼実験を行い、燃焼灰を X 線結晶回析で分析し、代表的な結晶性シリカであるクリストバライト生成の有無について調べた。その結果、今回調査したボイラーの 3 基については燃焼中に結晶性シリカが生成されたが、残る 2 基のボイラーでは結晶性シリカは生じなかった。しかし、燃やせる籾殻の量が少なく熱出力が低い、もしくは籾殻を粉砕する高コストな前処理が必要などの課題が残った。今後、ケイ素分の結晶化をさせずに燃焼できる炉の開発もしくは燃焼温度・時間を最適化した条件の確立が必要である。

キーワード: 籾殻, 燃焼, 熱供給, 結晶性シリカ, 発がん性物質, X線結晶解析

研究の背景

はじめに

東日本大震災に起因する原発事故以降、太陽光や風力といった再生可能エネルギーが注目され、地域の有機性廃棄物をバイオマス燃料として利用しようとする試みも進んでいる。しかし、相次いで木質バイオマス発電所が建設されたことで間伐材などの木質チップはすでに価格が高騰し、木質系有機資源の潜在的な供給力とその安定性には限界があることも示されている。一方、米の生産によって発生する籾殻は、毎年常に一定量が生じる。籾殻には稲の健全な生育に欠かせないケイ酸分が多量に含まれるため、本来であれば圃場還元することが望ましいが、比重が小さく (0.1 t/m³)、運搬効率が悪いとため圃場還元が困難である。そのため、主に籾摺りを行う精米工場付近に大量に発生し、集積している。農水省の調

査では国内で生じる籾殻の 25%は、未利用のまま廃棄されているとの報告がある。

この籾殻をバイオマス燃料として熱や発電に利用しようとする試みが、カントリー方式で局所的に籾殻が発生する大潟村などで検討されている。籾殻は、収集する必要がないバイオマスであり、乾燥し、さらに均一な状態で例年一定量が供給できるため、バイオマス燃料としてまさに理想的と言える。しかし、籾殻の燃焼による発電や熱利用は国内ではほとんど実用化されていない。

バイオマス燃料としての籾殻の問題点

籾殻に含まれるケイ素分 (シリカ) は高温燃焼により非晶質から結晶性に変化し、燃焼炉内でクリンカと呼ばれる結晶性シリカの塊が形成されるため、炉の運転に悪影響が生じることが以前から問題となっていた。また、籾殻のケイ素分は重量比で 20%を

超え、燃焼条件によらず気化しないため、投入した籾殻重量の 20%を超える多量の燃焼灰が生じる。

籾殻を高温で燃焼させると、含まれるケイ素分が結晶化する（伊藤ら.2004）。この結晶性シリカは国際がん研究機関（IARC）でヒトに対する発がん性を有すると分類され、粉じんとして吸入した場合、健康上の問題があるとされる。日本では、日本産業衛生学会が定めた労働環境管理上の許容濃度以下にしなければならない。現在は結晶性シリカ＝発がん性物質という位置付けとなっており、燃焼灰に結晶性シリカすなわち発がんリスクのある物質を含むということになり燃焼炉の運転・管理や燃焼灰の有用利用は困難なものになる。純粋なケイ素は 1000℃近くの高温でも結晶化しないが、籾殻はカリウムやマグネシウムなどのアルカリを含み、その影響でより低温でも結晶化する（Umeda & Kondoh. 2008., Venezia ら. 2001）。

日本のメーカーが海外で建設した籾殻発電プラントで結晶性シリカが生じているという問題が大きく取り上げられるなど、結晶性シリカの生成は籾殻の燃料利用における大きな障壁となっている（秋田さきがけ新報. 2016）。

燃焼灰のケイ素分の有効利用による資源循環

籾殻のケイ素分は重量比で 20%を超え、燃焼条件によらず気化しないため、完全燃焼しても 2 割近い燃焼灰が生じ、その処理は大きな問題となる。燃焼灰の主成分であるケイ素が水に溶けて生じるケイ酸は稲の生育に必要な成分である。ケイ酸分は籾殻として圃場外に持ち出されてしまうため、ケイカルなどのケイ酸肥料を慣行施用する農家も多い。このケイカルに替え、籾殻として持ち出したケイ素分を圃場還元すれば、養分を循環させることができ、燃焼灰の有効利用により、その処理費用を軽減するもしくは有価物としての販売も可能であると考えられる。

籾殻燃焼は、現状圃場還元が難しい形態の籾殻（運搬効率が悪い、撒きにくい）から、その有用成分であるケイ素分を取り出すことができる（重量で 1/5、体積で 1/10 に濃縮できる）。

籾殻の有効利用を目指した大潟村の取り組み

大潟村では、持続可能な農業とエネルギーの地産地消を図るために、村内の農業等から排出されるバイオマス資源や村内に賦存する自然資源（バイオマス、風力、太陽等）を活用したエネルギー生産システムとそれを村内に供給するインフラシステムの構築を図ることを目的として、これまで様々な取り組みを行ってきた。

村内における籾殻の発生量は、約 11,000 t/年と推測される。籾殻の利用としては暗渠の補助材、その他には畜産農家への譲渡が一部にみられる程度で、有効活用として特記するものは見られていない。そのため、これまでの実績から暗渠利用に約 3,000 t/年程度利用されると想定しても、約 8,000 t/年がバイオマス燃料に利用可能と考えられる（図 1）。

籾殻をバイオマス資源として活用するエネルギープロジェクトの将来像として、熱需要密度の高いホテルや温泉利用施設などに対しての熱供給が考えられ、籾殻の有効利用が期待されている。

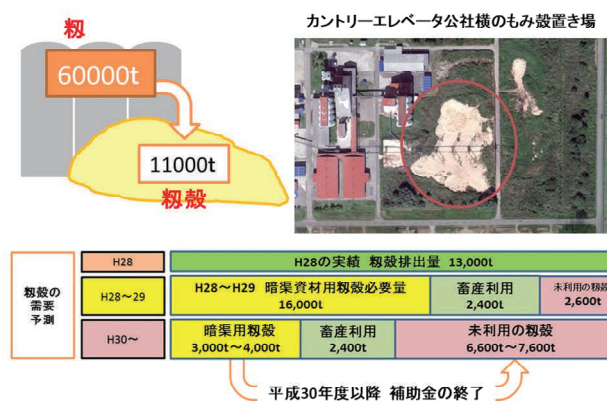


図 1 大潟村の籾殻賦存量

研究目的

籾殻をバイオマス燃料として利用するためには結晶性シリカを生じない燃焼炉の選定と燃焼条件を確立する必要がある。

本研究では大潟村と共同で国内外の燃焼炉を用いて籾殻の燃焼試験を実施し、籾殻燃焼による熱利用への実用的なデータを得ることを目的とした。

方法

燃焼炉の調査

国内 4 基、海外（デンマーク）1 基、計 5 基のボー

ラーで籾殻を燃焼させ、生じた燃焼灰の元素組成分析、燃焼効率の推定、結晶性シリカの含有について分析を行った。今回用いた国内4基のボイラーはI市の籾殻燃焼実証機、T社燃焼炉、I社バーナー式燃焼機、K社燠炭製造炉、海外はR社の木質バイオマスの燃焼炉である。

燃焼効率および燃焼灰の元素組成の解析

燃焼灰の分析は全窒素、全炭素分析(VarioMax; Elementar Analytical)、灼熱損失量により、燃焼灰中に含まれる成分組成を推定した。

分析方法は籾殻および燃焼灰を分析前に105℃で乾熱し、水分含量は0とし、灼熱損失量は650℃6hでの燃焼による減少量をAsh(%)とし、この処理で残存するものはシリカ分+無機塩類とした(籾殻の分析結果から無機塩類、シリカ含量は2%、20%とした)。

計算式 ; $22 \div (\text{Ash}(\%) / 100) = \text{燃焼灰量}$

(% or 100g の籾殻を燃焼した場合の g)

燃焼灰量 × 全炭素(%) ÷ 100 = 燃焼灰の炭素量 (g)

燃焼灰量 - 22 - 炭素量 = 燃焼灰の酸素+水素量 (g)

燃焼灰に含まれる結晶性シリカの検出

燃焼灰サンプルをメノウ製乳鉢で粉碎、パウダー状にし、測定用スライドガラスに充填したものをX線結晶解析装置(RINT2500 Rigaku)により分析し、クリストバライトのピーク検出を行った(中村と貴家. 1973., 伊藤と塚野. 1991)。

結果と考察

I市の籾殻燃焼実証機

I市の籾殻燃焼実証機は炉内の温度を複数のプローブにより常に計測し、籾殻が結晶化しない温度に厳密に制御・低温燃焼させている(施設視察時500℃以下で燃焼)。

燃焼灰サンプルの分析では炭素ベースの燃焼率は極めて高く(残存炭素率は0.86%)、投入した籾殻はほとんど完全燃焼している。また、X線結晶解析では結晶化を示す明確なピークが検出されず、燃焼灰中のシリカは結晶化していないことが示された。

実証機の当初の目的が籾殻の焼却処理であるため、熱利用が副次的なものである。炉内温度の制御を主に籾殻の投入量で制御している(炉内温度が高くなりすぎないように投入量を絞っている)ため、時間当たりの燃料投入量が制限され、熱出力が低いことが熱利用のボイラーとして問題がある。



図2. I市のもみ殻燃焼実証機



	理論値 籾殻	燃焼灰 I市
残存量(g)	100g	22.9
1 シリカ	20	20
2 無機塩類	2	2
3 炭素	31.2	0.20
4 酸素、水素	46.8	0.74
	100	
Ash (%)	22	95.93
TotalC (%)	31.2	0.86
燃焼効率(%)	100%時	99.4
生成熱量(Kcal)	300	298

図3. I市のもみ殻燃焼実証機の燃焼効率
燃焼効率は99.4%と極めて高い。

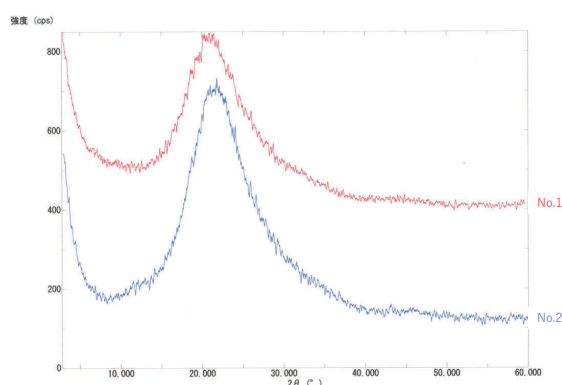
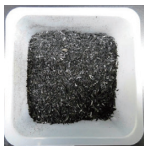


図4. I市のもみ殻燃焼実証機のX線結晶解析の結果
サンプルNo.1、No.2ともに代表的な結晶性シリカであるクリストバライトのピークは検出されなかった。

T社燃焼炉

T社のストーカ式燃焼ボイラーで大潟村が実施した燃焼試験で得られた燃焼灰の分析を行った。着火には木質ペレットを使用しており、燃焼時間ごとに燃焼灰を経時的にサンプリングし、サンプル名 ; T

社サンプル 1~4 とした。サンプル 2~4 は籾殻を主とした燃焼であり燃焼効率は 98% と良い。しかし、燃焼中の燃焼灰サンプルおよび灰出スクリーンから搬出された灰、燃焼後の炉内残留燃焼灰は X 線結晶解析の結果、いずれも結晶性シリカ（クリストバライト）の強いピークが検出され、高温燃焼によるケイ素分の結晶化が明らかとなった。



	理論値 籾殻	燃焼灰				灰出スクリーン	燃焼後
		T社-1	T社-2	T社-3	T社-4		
残存量 (g)	100g	30.3	23.4	22.9	23.3	23.6	23.8
1 シリカ	20	20	20	20	20	20	20
2 無機塩類	2	2	2	2	2	2	2
3 炭素	31.2	5.77	0.53	0.66	0.51	0.93	0.81
4 酸素、水素	46.8	2.56	0.89	0.27	0.79	0.65	0.96
	100						
Ash (%)	22	72.51	93.94	95.93	94.41	93.32	92.54
TotalC (%)	31.2	19.03	2.26	2.69	2.20	3.93	3.42
燃焼効率 (%)	100%時	81.5	98.3	97.9	98.4	97.0	97.4
生成熱量 (Kcal)	300	244	295	294	295	291	292

図5. T社のストーカ式燃焼ボイラーの燃焼効率
燃焼効率はサンプルNo.1が81.5%、No.2が98.3%、No.3が97.9%、No.4が98.4%であった。

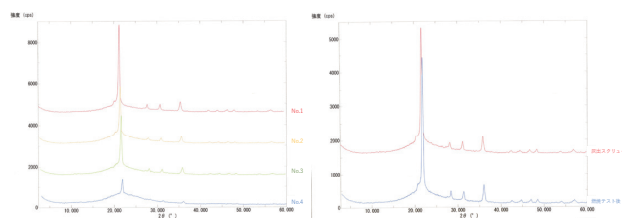


図6. T社のストーカ式燃焼ボイラーのX線結晶解析の結果
サンプルNo.1~4および灰出スクリーンから搬出された灰、燃焼後の炉内残留燃焼灰は、いずれもクリストバライトのピークが検出された。

I 社バーナー式燃焼機

バイオマス小規模分散型熱利用装置として開発された I 社のバーナー式燃焼機は粉末状の籾殻をバーナー式に燃焼させて、その熱によって温水を供給する。バーナーには 500 μm 程度に粉砕した籾殻を導入する必要があるため、籾殻の粉砕装置と粉砕工程（電気代 4 円 / kg 籾殻）が前処理に別途必要となる。

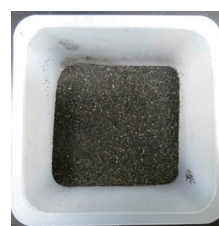
燃焼はバーナー方式であり、その燃焼温度は 1000℃ 以上と極めて高く、高温のためボイラーの熱変換効率は 85% 以上と高い。

籾殻燃焼灰サンプルを分析した結果、燃焼灰には 2.5% 程度の炭素が含まれ黒く細かい粉炭状である。現地試験を実施している北海道では色と形状を生かし融雪剤への有効利用が検討されている。

籾殻の燃焼効率は 92% であった。燃焼灰の X 線結晶解析を実施したところ、結晶性シリカを示すピークは検出されなかった。バーナー方式による燃焼は

高温燃焼であるが、バーナーから噴射、燃焼、熱交換するため、燃焼物の温度は数秒で、瞬時にケイ素が結晶化しない温度帯に低下する。そのため結晶性シリカが生じないと考えられた。

ボイラー自体は灯油焚きボイラーとほぼ同じ構造をしており、温水供給もバーナーの ON-OFF により制御できるため、熱需要に合わせて温水供給の面でも利便性は高いと考えられる。問題点としては籾殻の粉砕加工に別途粉砕機の導入、電気代などの高額なランニングコストが生じることである。



	理論値	燃焼灰
	籾殻	I社
残存量 (g)	100g	27.4
1 シリカ	20	20
2 無機塩類	2	2
3 炭素	31.2	2.67
4 酸素、水素	46.8	2.73
	100	
Ash (%)	22	80.29
TotalC (%)	31.2	9.73
燃焼効率 (%)	100%時	91.5
生成熱量 (Kcal)	300	274

図7. I社のバーナー式燃焼機の燃焼効率
燃焼効率は91.5%であった。

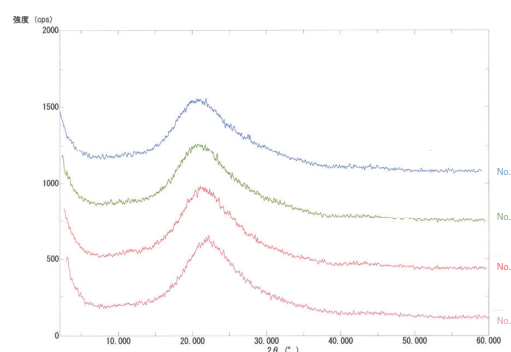


図8. I社のバーナー式燃焼機のX線結晶解析の結果
サンプルNo.1~4では、代表的な結晶性シリカであるクリストバライトのピークは検出されなかった。

K 社燠炭製造炉

関西産業は高効率の燠炭製造装置の国内トップメーカーである。籾殻を炭化させた燠炭は園芸用の育苗培土等への需要が高く、高値で流通している。燃焼炉は燠炭製造装置であるため、導入に関しては燠炭の販売ルートの確保が前提となる。

燠炭は小規模・簡易には籾殻を堆積し、煙突を中央に立ててゆっくりと炭化させて製造されている。それに対し K 社の燠炭製造炉は籾殻の投入、燃焼、取り出しを連続的に行っているため、生産能力が極めて高い。しかし、熱利用の面から見ると燠炭製造が主であるため、炉内が高温になり籾殻を燃焼させ

すぎないように炉に送り込む空気の量を調整して燃焼を制御している（製造した燻炭の炭素率は10%）。また燻炭の形状が失われないように一定時間で炉から取り出すことから、籾殻の燃料としての燃焼効率は低い（70%以下）。そのため、一定の熱出力の確保するためには、未燃焼分を考慮してより多くの籾殻とより大型の燃焼炉が必要となる。

また、製造された燻炭を粉碎し、X線結晶解析を行ったところ微小ではあるが、結晶性シリカのピークが確認され、燻炭製造時においても温度制御などの改善の必要性が示唆された。

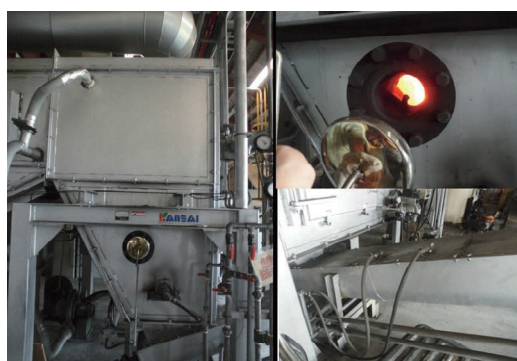


図9. K社の燻炭製造炉



	理論値	K社 燻炭
	籾殻	
残存量 (g)	100g	44.7
1 シリカ	20	20
2 無機塩類	2	2
3 炭素	31.2	9.38
4 酸素、水素	46.8	13.36
	100	
Ash (%)	22	49.18
TotalC (%)	31.2	20.96
燃焼効率(%)	100%時	69.9
生成熱量 (Kcal)	300	210

図10. K社の燻炭製造炉の燃焼効率
燃焼効率は69.9%であった。

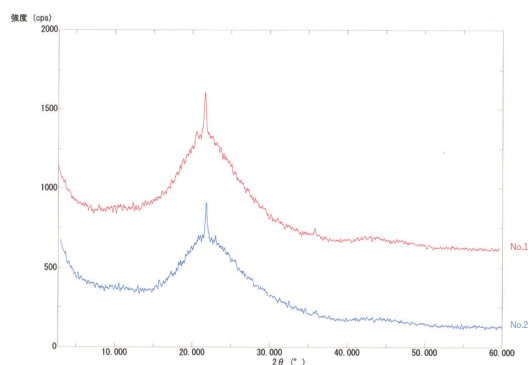


図11. K社の燻炭製造炉のX線結晶解析の結果
サンプルNo.1、2において代表的な結晶性シリカである
クリストバライトのピークは検出された。

R社の木質バイオマス燃焼炉

大潟村役場がデンマークに籾殻を送り、R社製燃焼炉を用いて燃焼試験を実施し、その燃焼灰を分析した。燃焼灰に残存する炭素量はいずれのサンプルも1%以下とほぼ完全燃焼しており、燃焼率は99%近くであると考えられた。しかし、燃焼灰のX線結晶解析の結果、いずれのサンプルからも結晶性シリカのピークが強く検出され、燃焼時の温度制御に問題があることが示された。

	理論値	R社-1	R社-2	R社-3	R社-4	R社-5
残存量 (g)	100g	22.7	22.5	22.8	22.7	23.6
1 シリカ	20	20	20	20	20	20
2 無機塩類	2	2	2	2	2	2
3 炭素	31.2	0.66	0.50	0.24	0.57	0.39
4 酸素、水素	46.8	0.07	0.01	0.58	0.18	1.22
	100					
Ash (%)	22	96.76	97.71	96.41	96.72	93.15
TotalC (%)	31.2	2.91	2.24	1.04	2.50	1.66
燃焼効率(%)	100%時	97.9	98.4	99.2	98.2	98.7
生成熱量 (Kcal)	300	294	295	298	295	296

図12. R社の燃焼炉の燃焼効率
燃焼効率はサンプルNo.1が97.9%、No.2が98.4%、No.3が99.2%、
No.4が98.2%、No.5が98.7%であった。

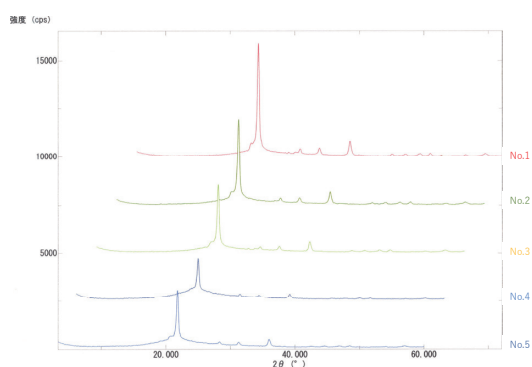


図13. R社の燃焼炉のX線結晶解析の結果
サンプルNo.1～5において代表的な結晶性シリカである
クリストバライトのピークは検出された。

まとめ

今回調査した5基の燃焼炉では3基の燃焼炉でもみ殻の燃焼により燃焼灰中に結晶性シリカが生成された。2基の燃焼炉では燃焼時に結晶性シリカは生成されず籾殻の安全な燃焼が可能であった。

しかし、I市の実証機は500℃以下に炉内の温度の制御を時間あたりの籾殻投入量の制御で行っており、ボイラーとしての熱出力は期待できない。また、I社のバーナー式の燃焼機については籾殻を粉碎する前処理にコストがかかる。

以上のように、今回調査した燃焼炉の中には安全かつ低いランニングコストで籾殻による熱供給が可

能な燃焼炉はなかった。

今回の調査では、高温での燃焼も短時間の燃焼であればケイ素分が結晶化しないことから、燃焼時間と温度の組み合わせを検討することで効率の良い燃焼を達成できる可能性も示された。今後、更に燃焼炉の調査や開発、運転条件を検討し籾殻による熱供給の実現につなげたい。

〔 2019年6月30日受付
2019年7月9日受理 〕

謝辞

本研究は大潟村役場との共同研究によるものであり、視察調査に幅広い支援をいただいた。視察に同行いただいた役場顧問 小林由喜也氏、環境エネルギー室 石川歳男氏、畠山友伴氏、また高橋浩人村長にこの場を借りて感謝の意を表す。また本研究にはユーラス研究助成・地域活性化支援事業の多大な支援をいただいたこの場を借りて深謝する。

文献

秋田さきがけ新報 2016年3月6日「もみ殻発電で
発がん性物質」

伊藤栄二, 塚野守 (1991). 「X線回折」『色材協会誌』
64 (2), 100-110

伊藤純雄, Prakash N. B., 森泉美恵子, 高田芳三
(2005)「籾殻の低温燃焼による高溶解性ケイ酸
質肥料資材化」『関東東海北陸農業研究成果情報
(中央農業総合研究センター研究成果情報)』
2004 (3). 134-135

Umeda, J., & Kondoh, K. (2008). High-purity
amorphous silica originated in rice husks via
carboxylic acid leaching process. *Journal of
Materials Science*, 43. 7084-7090.

中村利広, 貴家恕夫 (1973). 「X線回折分析法にお
ける内標準物質の検討」『分析化学』22 (1), 47-54

Venezia, A. M., La Parola, V., Longo, A., & Martorana,
A (2001). Effect of Alkali Ions on the Amorphous
to Crystalline Phase Transition of Silica. *Journal of
Solid State Chemistry*, 161(2). 373-378

Evaluation of the boilers for combustion of rice husks

Combustion trials in the 5 boilers

Hiroki Rai¹, Miku Kawabata¹

¹ *Department of Biological Production, Faculty of Bioresource Sciences, Akita Prefectural University*

Twenty-five percent of the rice husks produced from domestic rice cultivation are discarded. Several trials have been conducted to utilize rice husks as biomass fuel for local heat demand and electricity generation. However, rice husk contains about 20% silicon, and when combusted at high temperature, the silicon is converted to crystallized silica classified as a carcinogen. In addition, a clinker is formed in the combustion furnace, which causes the faulty operation of the furnace. In this research, we conducted combustion tests on rice husks with four domestic and one foreign boiler to clarify the problem of heat utilization during rice husk combustion. The combusted ash was analyzed by X-ray crystallography to investigate the production of the cristobalite, which is a typical crystalline silica. Results indicated crystalline silica was generated during combustion in three of the boilers. Two boilers combusted rice husks without producing crystallized silica. However, one of the boilers could not achieve a high heat output due to lower temperature combustion, and the other required the rice husks to be ground to fine particles as a pretreatment and the process costs were high. It was considered necessary to improve the boiler or establish a new type of operation to prevent silicon crystallization, by combining the combustion temperature and time optimally to manage these problems.

Keywords: rice husk, combustion, heat utilization, crystallized silica, carcinogen, X-ray crystallography