

水素バーナの開発 ～Phase2 アスファルト混合物製造試験～

長谷川 修磨・北野 裕樹・今田 雄司
Hasegawa Shuma, Kitano Yuuki, Konta Yuji

概要

世界的な温暖化対策として、2015年にパリ協定が策定された。そのため、日本政府は2021年に「2030年度に温室効果ガスを2013年度から46%削減すること」を目指す表明をした。アスファルトプラント(以下、APと記述)業界においても目下の課題に向けて温室効果ガス排出量の削減に精力的に取り組んでいる。APにおいて温室効果ガスであるCO₂を最も排出するのは、骨材の乾燥加熱で消費する化石燃料由来のものであるため、これらに代わる次世代の燃料としてCO₂を発生させない水素燃料を使用できるバーナの開発を行っている。当社は、東京ガスエンジニアリングソリューションズ株式会社と水素バーナを共同開発し、2023年3月には500kW水素バーナの開発に至った¹⁾。本稿では、開発した500kW水素バーナがAPで、実際に運用が可能であることを検証した水素バーナによるアスファルト混合物製造試験について報告する。

1. 緒言

18世紀後半の産業革命以降、人類は化石燃料を大量に消費しながら熱、電気エネルギーの恩恵を受けてきた。その代償として大気や海洋、河川などの環境への負荷も大きく、近年の異常気象で集中豪雨やエルニーニョ現象、ラニーニャ現象などが頻繁に発生するようになってきた。特に1850年以降は気温が上昇しており、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第6次評価報告書によると、今世紀末までには3.3~5.7℃の上昇になるだろうと言われている。このことから、国連のグレート事務総長が、このままでは温暖化よりも深刻な沸騰化の時代が到来することになってしまうと発言し警鐘を鳴らしている。

このような環境問題に対して全世界が危機感を共有している中、2015年にパリ協定が第21回気候変動枠組条約締約国会議(COP21)で採択され、目的として「世界の平均気温上昇を産業革命以前と比べて2度より十分低く保ち、1.5℃以内に抑える努力をする」ことが掲げられた。近年では、2023年11月に開催されたCOP28で1.5℃目標の実現に向かうために、2030年までに再生可能エネルギーの容量を3倍に、省エネ率を2倍にすることを掲げ、化石燃料からの脱却を更に加速させる意思を各国が提示している²⁾。

パリ協定に伴って、2021年に日本は2030年度に温室効果ガスを2013年度から46%削減することを目指す表明をしている。目標を達成するため、経済産業省が中心となり「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を策定した。

グリーン成長戦略では、産業政策・エネルギー政策の両面から、成長が期待される14の重要分野実行計画を策定され、エネルギー関連産業の1分野として水素があげられる。水素では2050年に2,000万吨程度、供給コスト20円/Nm³程度以下(2024年都市ガス熱量単価程度)を目指しており、エネルギー業界での導入拡大が見込まれる³⁾。

また、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第3期の課題にスマートエネルギーマネジメントシステムの構築があり、次世代の社会インフラを確立するため、再生可能エネルギー由来の電気や水素、熱を効率的に活用するとしている⁴⁾。

現在、APで排出されるCO₂の内訳は、骨材乾燥加熱による燃料由来が79%、事務所等での電力使用由来が19%、重機燃料その他由来が2%となっている。重油を基準にした時の発熱量当りのCO₂削減効果として、ガスへの燃料転換で都市ガス25%、プロパンガス15%の削減が期待されるが、これ以上の削減には他の技術との併用が必要である。そして、過去に開発したグリセリンや木質タール、もみ殻、炭化燃料などの燃料を使用したバイオマスバーナはバイオマス燃料の導入によってCO₂の削減が可能である⁵⁾が、バイオマス燃料を利用する場合には、発生地域からの運搬や利用するための供給体制も重要になることから、短期間でのAP全体へ利用を拡大することは難しい。

このような状況を踏まえて、これまでAPで使用されてきた化石燃料の代替燃料として、今後期待されている水素燃料を使用できるバーナの開発を行った。水素は、燃焼時に酸素

表1 AP使用燃料と水素燃料の比較⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾

燃料	A重油	プロパン	都市ガス(メタン)	水素
大気圧における沸点(℃)	150以上	-42.1	-161.6	-252.9
体積当たり低位発熱量(MJ/Nm ³)	-	91.2	41.6	10.8
質量当たり低位発熱量(MJ/kg)	41.9	46.6	50.2	120.4
発熱量当りCO ₂ 排出量(tCO ₂ /GJ)	0.0693	0.059	0.0499	-

と結びつき水を生成するのみでCO₂は発生しないため、非常にクリーンなカーボンニュートラル燃料である。燃料の安全性も考慮するとAPで利用し易いために、水素バーナ開発の優先度を高め、最短で製品精度を高めため、2022年より東京ガスエンジニアリングソリューションズ株式会社と水素バーナの共同開発を開始し、2023年3月には500kW水素バーナを開発した。

本試験では、開発した水素バーナを小型試験プラントへ実装し、アスファルト混合物を製造した。製造したアスファルト混合物の試験施工までを行い、小型試験プラント運転時のバランスと舗装材としての品質を評価する。そして、水素燃料を使用することで燃焼排ガスの水蒸気が増えるため、排ガス中の水蒸気がアスファルト混合物の品質とAP運転時の骨材温度制御、機器へ及ぼす影響を確認した。本稿では、前田道路株式会社小型試験プラントで水素バーナを用いてアスファルト混合物を製造した実装試験結果を報告する。

2. APにおける水素燃料

2.1 AP使用燃料と水素燃料の比較

全国のAPでバーナに使用している燃料の多くはA重油が使われている。都市部や沿岸部では、都市ガスやプロパンガス燃料の利用範囲が拡大してきており、工業関係設備のガス燃料化も急速に加速してきている。APで主に使用している燃料と水素燃料の比較を表1に示す⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

大気圧下20℃では、A重油のみが液体で存在し、プロパン、都市ガス、水素は気体で存在する。体積当たり発熱量はプロパン>都市ガス>水素であり、都市ガスの代わりに水素ガスを使用して同じ熱量を得るには4倍程度の流量が必要となる。

水素は他のガス燃料と比べて沸点が-252.9℃と低いため、液化させるには多くのエネルギーが必要となるが、質量当たりの発熱量が120.4 MJ/kgであり、他の燃料の2倍以上の発熱量を持っている。水素をクリーンな燃料で液化するためにエネルギーは必要であるが、液体にすることで体積が1/800になるので効率良く運搬できる。そしてこれから政府がカーボンニュートラルに向けて推進していく燃料となり注目されている。

2.2 APでの水素への燃料転換

APのバーナに使用している燃料から水素へ燃料転換を行う場合にメリットとして、骨材乾燥においてCO₂を排出しなくなる事が挙げられる。APでカーボンニュートラルを目指す上で重要な点であるが、現状水素へ燃料転換を行う場合、いくつかの課題が挙げられる。

- ・設備、燃料にかかるコストが高くなる
- ・低温液化状態での貯蔵
- ・気化をグリーンエネルギーで賄う必要性
- ・APで必要な量の水素供給が困難

現段階では、水素は従来の燃料よりコストが高いことに加え、都市ガスの様にパイプラインで供給ができる箇所が少ないため、水素燃料を貯蔵する設備のコストが設備投資への抑制になっている。そのため、APでの水素利用が普及するには、まずは水素の供給量が増加し、水素のインフラを整える必要がある。

表2 試験パラメータ

燃料	・重油 ・CNG ・水素 ・CNGと水素混焼(30%、50%、80%)
骨材流量	・5 t/h ・3 t/h(水素専焼のみ)

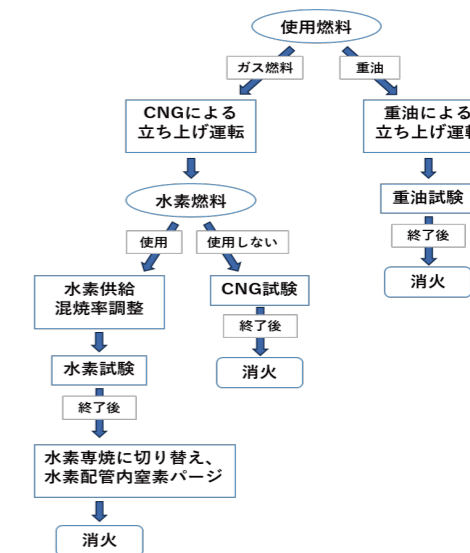


図1 運転方法フローチャート

3. 合材製造試験

3.1 試験条件

重油による試験は重油専用バーナで実施した。CNG (compressed natural gas 圧縮天然ガス、都市ガス13A)と水素の混焼は熱量を基準として水素の導入割合を変えて実施した。

水素使用後に消火する時は、配管中で残留水素と空気が可燃混合気にならないよう水素専焼状態にしてから窒素パーズで消火を行い、そのまま配管内部のガスを置換した。そして、運転中の骨材温度調整は骨材温度が210℃で安定するように燃料流量を制御しながら骨材乾燥を行った。本試験で実施したパラメータを表2に、運転方法のフローチャートを図1に示す。



写真1 水素バーナ

3.2 試験設備

前田道路株式会社小型試験プラントに2023年3月に東京ガス株式会社と共同開発した500kW水素バーナを設置した。設置した水素バーナの外形を写真1に示す。

3.2.1 水素バーナ

本試験での水素バーナの着火方法は従来の弊社ガスバーナ同様に、都市ガスでのパイロット着火を行った。都市ガスと水素はバーナ内のガスライン内で混合される元混合方式を採用し、1本のバーナノズルで都市ガスの専焼から水素の混焼、更に水素の専焼まで燃焼することが可能である。燃焼空気はバーナ後方にあるファンから供給し、水素燃料の流量に対して必要な空気量比率を任意に変更しながら調整を行った¹⁾。

3.2.2 燃料供給ライン

試験で使用したCNG燃焼装置を写真2に示す。CNG供給ラインでは流量計、電磁弁、ボールバルブ等を含む燃焼装置を使用した。本試験ではプラントへの影響を調査するために混焼率を任意に変更可能なように流量を調整できるようにした。

水素供給ラインではカードル(ポンペをまとめて枠組みし、ガスの取り出し口を集約したもの)から14.7MPaの水素が供給され、減圧ユニットにより0.2MPaまで減圧された水素が供給される。水素流量はマスフローコントローラを使用して量を調整した。

ガス燃料は高圧にするほど容積を小さくすることができるため容量当たりの熱量が高くなり、ポンペのサイズや配管径を小さくすることができるメリットがある。そのため、容積を小さくしてエネルギー密度を高くするために、CNGと水素は共に14.7MPaの高圧でポンペに充填されている。しかし、高圧のまま使用すると機器の損傷や急激な圧力変動で失火など



写真2 燃焼装置

の要因となるため減圧してから燃焼装置に供給している。

CNGと水素の供給ラインが合流管で合わさり、水素バーナに燃料を供給する。専焼時に切り替えられるように切換弁、水素供給ライン側には逆流に対する安全対策として、逆止弁を取り付けた。

3.2.3 試験プラント

試験で使用した小型試験プラントを写真3、プラント内ユニット機器の仕様を表3に示す。乾燥キルンのサイズはΦ1100mm×3500mmであり、プラントの骨材乾燥能力は5t/hである。水素バーナは当社の従来ガスバーナと同様にレトロフィットできるようにした。この水素バーナを小型試験プラントの重油バーナと入替し、合材製造試験を行った。

3.3 試験測定項目

下記に本試験で測定した項目を示す。

- ・骨材温度(投入骨材、排出骨材)
- ・骨材含水(試験前後の骨材含水比)
- ・排ガス成分 (NO_x、O₂、CO、CO₂、SO_x、H₂O、煤塵測定)
- ・排ガス量

骨材温度と骨材含水はベルトコンベヤ(ドライヤ通過前)とホットエレベータ(ドライヤ通過後)で骨材をサンプリングして測定する。排ガス成分と排ガス量の測定は小型試験プラント煙突部の測定口で測定を行った。排ガス成分の測定方法を表4に示す。

3.4 合材製造試験結果

3.4.1 骨材乾燥加熱結果

骨材供給量5t/hでの各燃料の専焼における骨材乾燥加熱の結果を表5に示す。各試験条件で加熱後の骨材温度を比較すると194~203℃の温度であることから水素は都市ガスと骨材加熱能力は同等で、温度上昇速度などの制御性に関しても同等で運用できた。

表5に示すように加熱前の骨材含水比は水素専焼時4.1%であり、重油専焼時の5.3%より低い値であるが、加熱後の骨材含水比が水素専焼時で0.08%と他の燃料専焼時と比べて高い値となった。水素専焼時の骨材含水比でもアスファルトの品質は従来と変わらないことを前田道路株式会社により確認した。

燃料の流量値は、乾燥後の骨材温度が安定している状態で測定している。試験条件から骨材の乾燥加熱に必要な熱量を試算し、熱効率を算出した。水素は重油と比べ熱効率が55.8%と低い数値を示したが、CNGの54.6%と同程度の熱効率であったため、都市ガスと同様に運用可能である。一般的に水素火炎からの輻射熱は通常の炭素を含む輝炎より十分小さいため、水素の熱効率がA重油と比べて低い結果となったと考えられる⁹⁾。どの燃料においても40%もの無効熱があるため、この小型試験プラント特有の影響があり、材料投入口等からの浸入空気が多いため、排ガス温度による無効熱が考えられる。



写真3 小型試験プラント

表3 小型試験プラント仕様

ユニット名	仕様※
ドライヤ	寸法：Φ1100×3500L 能力：5 t/h
バグフィルタ	濾布：72本 (50m ³)
排風機	風量：90m ³ /min 静圧：310mm Aq(3.1kPa)
第一煙道	径：Φ380

※記載なき単位は mm

表4 排ガス測定法

測定項目	測定法	機器
水分量	吸湿管法	-
ガス組成分析	オルザット法	-
煤塵量	円形ろ紙法	-
硫酸化物	イオンクロマトグラフ法	-
窒素酸化物	イオンクロマトグラフ法	-
CO	単光源二光束非分散赤外線吸収法	CGT-7000

表5 骨材乾燥加熱結果

燃料	[]	重油100%	CNG100%	水素100%
骨材供給量	[t/h]	5	5	5
加熱前骨材温度	[°C]	17	16	17
加熱後骨材温度	[°C]	194	203	196
加熱前骨材含水比	[%]	5.3	3.6	4.1
加熱後骨材含水比	[%]	0.02	0.01	0.08
バグ入口温度	[°C]	82	70	78
重油流量	[L/h]	42.0	0.0	0.0
CNG流量	[Nm ³ /h]	0.0	33.0	0.0
水素流量	[Nm ³ /h]	0.0	0.0	130.2
燃料熱量	[kW]	429	372	390
骨材加熱熱量	[kW]	74	78	75
骨材水分熱量	[kW]	184	125	143
有効熱量	[kW]	257	203	218
熱効率	[%]	60.0	54.6	55.8

表6 排ガス測定結果

使用燃料	[-]	重油100%	CNG100%	水素30%	水素50%	水素80%	水素100%	水素100%
骨材流量	[t/h]	5	5	5	5	5	5	3
CO ₂ 濃度	[%]	4.1	2.7	1.8	1.3	0.7	0	0
O ₂ 濃度	[%]	15.5	15.6	16.5	16.9	16.7	17.7	17.6
CO濃度	[ppm]	1472	275	71	15	8	3	3
煤塵量	[g/m ³]	0.007	0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.005未満	0.005未満
SO _x 濃度	[ppm]	3未満	3未満	3未満	3未満	3未満	3未満	3未満
NO _x 濃度	[ppm]	16	5	13	13	13	15	14
NO _x 濃度(O ₂ 16%換算)	[ppm]	15	5	14	16	15	23	20
排出ガス量(湿り)	[Nm ³ /h]	2250	1970	1960	1950	1930	2240	1980
排出ガス量(乾き)	[Nm ³ /h]	1950	1770	1810	1790	1670	2010	1780
排ガス水分量	[Vol%]	13.2	10.4	7.9	8.2	13.5	10.3	10.1
骨材含水比	[%]	5.61	3.56	4.09	4.09	3.56	4.09	4.09

表7 水蒸気量試算結果

使用燃料	[-]	重油100%	CNG100%	水素30%	水素50%	水素80%	水素100%	水素100%
骨材流量	[t/h]	5	5	5	5	5	5	3
骨材由来水蒸気量	[Nm ³ /h]	369.8	229.7	265.3	265.3	229.7	265.3	159.2
燃料由来水蒸気量	[Nm ³ /h]	55.6	66.0	92.2	87.1	102.0	130.2	110.0
大気由来水蒸気量	[Nm ³ /h]	27.9	25.6	26.4	26.1	24.4	29.5	26.1
理論水蒸気量	[Nm ³ /h]	453.4	321.3	383.9	378.5	356.1	425.0	295.3
実際水蒸気量	[Nm ³ /h]	297.0	204.9	154.8	159.9	260.6	230.7	200.0
凝縮水蒸気量	[Nm ³ /h]	156.4	116.4	229.1	218.6	95.6	194.3	95.3
凝縮水量	[L/h]	125.7	93.6	184.1	175.7	76.8	156.1	76.6

3.4.2 排出ガス測定結果

各条件における排ガス測定結果を表6に示す。

表6に示すようにCO₂濃度は重油専焼時に4.1%であり、CNG専焼時は2.7%と減少していることが確認できた。これは発熱量当りのCO₂排出係数が重油よりCNGの方が低いためである。水素燃料の混焼率が高くなるにつれCO₂濃度が減少していき、水素専焼の条件ではCO₂は検出されなかった。水素は燃焼時に酸素と結びつき水を生成するのみでCO₂は発生しないため、現象結果と一致した。また、CO濃度もCO₂濃度と同様に水素燃料の混焼率が高くなるにつれCO濃度が減少していく傾向を示しており、特に重油は小型試験プラントのため、キルン長さが短く燃焼しきる前に温度の低い材料に冷やされてしまい未燃が多くなっていると考えられ、1472ppmという数値を示している。水素専焼でCOが検出されているが機器誤差の範囲内(CO測定レンジ2500ppm、誤差±2%)であると考えられる。

表6に示すように煤塵量はガス燃料で測定限界以下であり、重油でも規制値より低い値であるため、水素燃焼による問題はみられなかった。

NO_x濃度をO₂濃度16%で換算した値のグラフを図2に示す。APで使用する場合に懸念点としてサーマルNO_xが挙げられる。これは大気汚染防止法でNO_xの排出量に基準値が設けられており、骨材乾燥炉の排出基準値は230

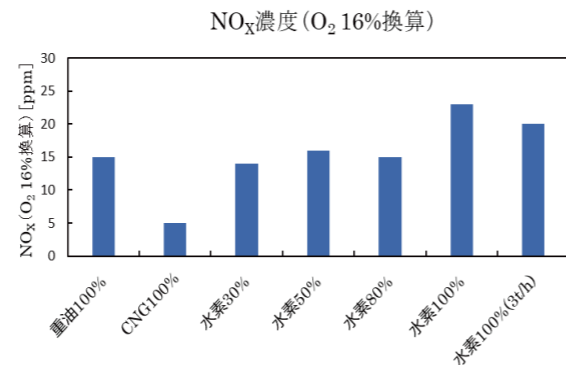


図2 NO_x濃度(O₂16%換算)結果

ppmとなっているため基準を満たす必要がある¹⁰⁾。今回測定したすべての条件で基準値と比べ低いNO_x値となっている。水素専焼でのNO_x値が23ppmであり、CNG専焼の5ppmと比べて高い値となり、開発段階での試験と同様の結果を示した。水素は燃焼速度が速く、局所的な高温部分ができるため、サーマルNO_xがCNGより増加することが知られており、このような傾向と一致している。

排出ガス内の水分量の測定結果から、試算した凝縮水蒸気量の値を表7に示す。

試験結果より、実際の水蒸気は重油専焼で297.0Nm³/h、CNG専焼で204.9Nm³/h、水素燃焼で230.7Nm³/hとなった。

理論値では、水素1Nm³を燃焼した時に0.8kgの水が発生する。表7に示すように水素は重油やCNGと比べ、燃料

由来の水蒸気量の割合が多くなるため、水素燃料を使用すると骨材乾燥での総水蒸気量が増加することになる。しかし、試験条件ごとに骨材含水が3.56~5.61%とバラつきがあるが、今回行ったすべての条件で排ガス中の水蒸気量の割合として骨材由来のものが多いため、実際の水蒸気量に対して燃料由来の水蒸気量の影響は許容範囲である。加えて、試算した凝縮水蒸気量の値は、水素燃料の混焼率に比例する結果になっていないことが確認できた。

これは、排ガス温度によって飽和水蒸気量が変わるため、表7に示すように凝縮水蒸気量が76.6~184.1L/hとバラつきがある結果になったと考えられる。水素燃料への転換を行うことで一概に凝縮水蒸気量が増えるわけではなく、排出ガスの温度を管理すれば凝縮水の排出量を減らすことが可能であることも、予備試験で行った小型試験プラントで排ガス温度を上げた時の煙突や煙の様子から確認することができた。

4. 結言

500kW水素バーナを開発し、本アスファルト混合物製造試験の結果から懸念としてあった水素燃焼における水蒸気発生の影響とアスファルト合材の品質においては、これまでのガスバーナ同様の運用ができること、そしてアスファルト合材の品質に問題がないことが確認された。

一方で、AP実機へ水素バーナを設置するには前述した「設備、燃料、貯蔵コスト」、「水素燃料の確保」などの社会的課題が残っている。都市ガスとグレー水素の熱量当たりの単価差が約2倍、グリーン水素とグレー水素では約6倍の単価差がある。これらの問題を解消できるように、まずは2030年を目途に水素が利用し易くなるように支援、補助金などの議論がなされているため、いつでも水素バーナ設備をAPへ実装できるようにする。一般的なAPに用いられる出力5MW以上のバーナへのスケールアップを進めていく予定である。Phase1での試験結果から500kW水素バーナは水素に加えて、都市ガス燃焼においても低NO_xでの燃焼を維持できることから、都市ガス専焼でも使用できるようになっている。

また、AP以外の分野でもカーボンニュートラル達成に向けて水素が期待されているため、水素バーナの燃焼技術、低NO_x化技術を活かして、新たな製品の開発にも注力している。

References

1 北野 裕樹, 今田 雄司 2023 水素バーナの開発 ~Phase 1~ NIKKO TECHNICAL REPORT No.004, pp.39-44.

2) 経済産業省 資源エネルギー庁
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2020html/1-3-1.html>
 (参照日2024年1月19日)

3) 経済産業省
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/index.html
 (参照日2024年1月19日)

4) 内閣府
https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sip3rd_list.html
 (参照日2024年1月19日)

5) 日工株式会社 2023日本建設機械施工協会 機械部会 路盤・舗装機械技術委員会 令和4年度活動報告

6) ENEOS
<https://www.eneos.co.jp/business/sds/gasoline/>
 (参照日2024年1月19日)

7) Iwatani
<https://www.iwatani.co.jp/jpn/business/energy/basic-knowledge/fuel/>
 (参照日2024年1月19日)

8) 小林 秀昭, 早川 晃弘 (2016年) 「カーボンフリーアンモニア燃焼」日本燃焼学会誌 第58巻 183号pp.41-48.

9) 武野 計二 (2010年) 日本燃焼学会誌 第52巻 160号 pp.121-129.

10) 環境省
<https://www.env.go.jp/air/osen/law/t-kise-6.html>
 (参照日2024年1月19日)

筆者紹介



HASEGAWA Shuma
 長谷川 修磨
 2022年入社
 開発部 開発1課



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