

アスファルトプラントにおける水素燃料利用

今 田 雄 司・村 本 孝

アスファルトプラント（以下、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 を発生させないカーボンニュートラル燃料を使用できるバーナの開発を行った。本稿では、2023 年 3 月に 500 kW 水素バーナを開発した内容と、実験用アスファルトプラントを使用したアスファルト混合物製造試験について実施した内容を報告する。

キーワード：水素，バーナ，アスファルトプラント，アスファルト混合物，カーボンニュートラル，カーボンハーフ，カーボンゼロ

1. はじめに

地球温暖化による気候変動が深刻化する中、水素はクリーンなエネルギー源として世界中で注目を集め、各国政府は再生可能エネルギーを活用したグリーン水素の生産拡大や水素インフラの整備など、独自の「水素戦略」を打ち出している。水素は、脱炭素社会の実現に不可欠なエネルギー源として期待されており、今後も各国が連携し、技術開発や国際的な枠組みの構築を進めることで、水素社会の実現が加速すると期待されている。

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。重油を基準にしたときの発熱量当たりの 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。

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。本稿では、水素バーナの開発の状況¹⁾と、実験用アスファルト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²⁾を報告する。

2. AP における水素燃料

(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^{3)~5)}。大気圧下 20℃ では、A 重油のみが液体で存在し、プロパンガス、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ガス>都市ガス>水素であり、都市ガスの代わりに水素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

表—1 AP 使用燃料と水素燃料の比較^{3)~5)}

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
発熱量当たり CO ₂ 排出量 (tCO ₂ /GJ)	0.0693	0.059	0.0499	—

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。水素は液体にすることで体積が 1/800 になるので、効率よく運搬できる。

そして、これから政府が 2030 年のカーボンハーフと 2050 年のカーボンゼロにアンモニア燃料と合わせて水素燃料は推進していく燃料となっており、今後さらに注目される新しい燃料となっている。

(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のメリットとして、骨材乾燥において CO₂ を排出しなくなることが挙げられる。AP でカーボンニュートラルを目指す上で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に関わる技術的課題
- ・ 液化水素の気化をグリーンエネルギーで賄う必要性がある
- ・ AP で必要な量の水素供給が困難である

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、都市ガスのよう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。

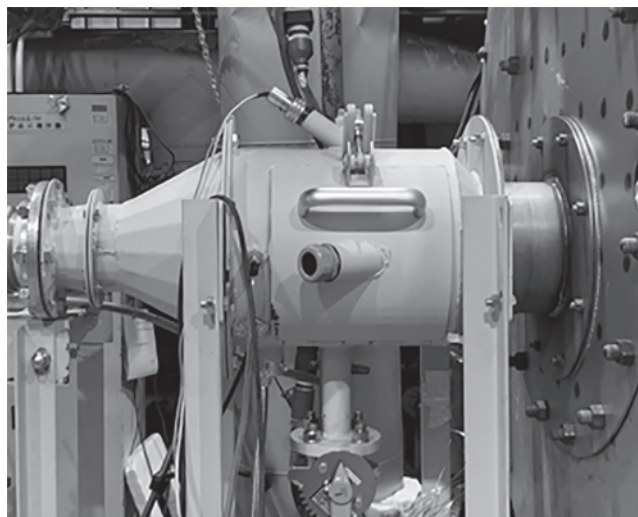
3. 水素燃焼試験

水素バーナは都市ガス専焼から都市ガスと水素の混焼、そして水素専焼が可能なバーナを開発した¹⁾。

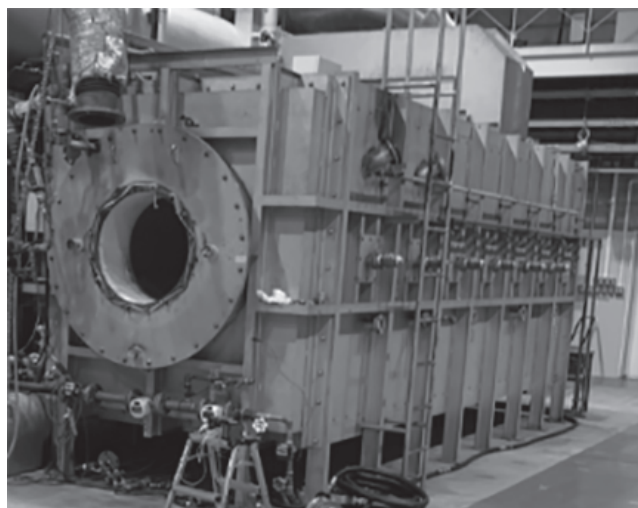
(1) 水素燃焼試験装置

(a) 水素バーナ

水素バーナの外形を写真—1 に示す。開発した水素バーナはアスファルトプラントでの利用を考え、従来のバーナとレトロフィット可能な形状で設計している。本水素バーナは、着火を安全で確実にを行うため、着火時に使用するパイロットガスは都市ガスを使用している。都市ガスと水素はメインガスラインに入る前に混合ラインを切り換えることで専焼と混焼を使い分け、燃焼用空気はバーナの後方から供給される。そして、燃料の理論空気量に対する実際の燃焼空気との比率(以下、空気比)を任意に変更できるようにしている。



写真—1 水素バーナ



写真—2 試験炉

(b) 試験炉

試験で使用した燃焼炉を写真—2 に示す。試験炉は約 800 kW のバーナ試験に適した容量であり、断熱、保温のために内部にキャストブル施工をしている。また、煙道温度を一定にするため排ガス温度を下げる水冷管が炉内に設置されている。大型燃焼炉は天井に熱電対が 30 本(幅方向 5 列×全長方向 6 列)設置されている。

(c) 排ガス測定装置

使用した排ガス測定装置の型式を表—2 に示す。表に示すように N₂O 以外の測定はホダカ製の排ガス測定装置を使用し、表—3 に示すように N₂O の測定には富士電機製の排ガス測定装置を使用した。

(2) 試験方法

下記のパラメータにて試験条件を設定した。

- ・ 燃料種類 (都市ガス、水素)

表—2 ホダカ排ガス計仕様

排ガス測定装置 1	
メーカー	ホダカ
型式	HT-3500
測定方式①	ガルバニ電池式
測定ガス①	O ₂
測定方式②	非分散型赤外線方式
測定ガス②	CO, CO ₂ , CH ₄
測定方式③	低電位電解式
測定ガス③	CO, NO, NO ₂

表—3 富士電機排ガス計仕様

排ガス測定装置 2	
メーカー	富士電機
型式	ZKJFSC16
測定方式①	非分散型赤外線吸収法
測定ガス①	NO, N ₂ O
測定方式②	磁気式
測定ガス②	O ₂

- ・ AP での使用を想定した空気比
- ・ バーナパーツ組み合わせ

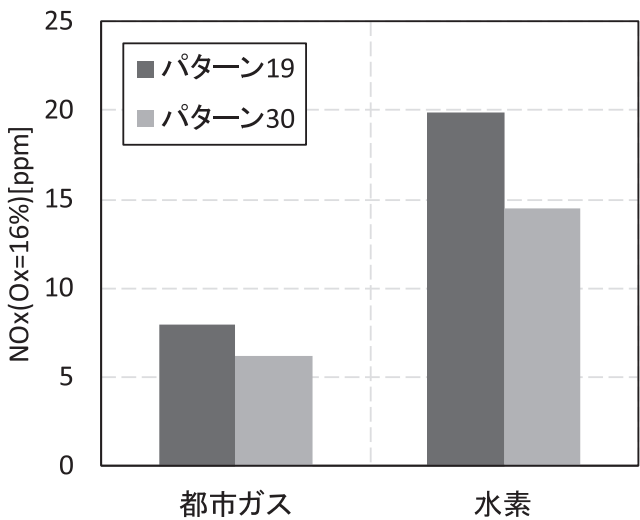
熱出力 500 kW を合わせるため、都市ガス専焼では都市ガス 44.4 Nm³/h、水素専焼では水素 167.0 Nm³/h にて試験を行った。

(3) 水素燃焼試験結果と考察

(a) パーツ比較試験

どちらのパーツにおいても都市ガスよりも水素の NO_x が高くなることが確認された(図—1)。これは、都市ガスよりも水素の燃焼速度が速く、局所的な高温部分ができることにより、サーマル NO_x が増加することによる影響と推測される。また、従来ガスバーナ製品に近いパターン 19 よりも水素用パーツ構成のパターン 30 の方が、燃料種類と空気比が異なる条件下においても NO_x を低下させることができた。パターン 19 よりもパターン 30 の方が、火炎が広がらないように設計しているためパターン 19 よりも火炎の表面積が小さくなっている。その影響によりサーマル NO_x が減少したものと推測される。大気汚染防止法では、NO_x の排出基準値は 230 ppm であるが⁶⁾、都市部ではさらに厳しい基準(25 ppm：東京都 23 区)が設けられている⁷⁾。

今回の結果では都市ガス専焼でも水素専焼の両条件であっても NO_x 値は 25 ppm 以下となり、良好な結果といえる。



図—1 パーツ比較 空気比 B NO_x

表—4 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	・5t/h ・3t/h (水素専焼のみ)

4. アスファルト混合物製造試験

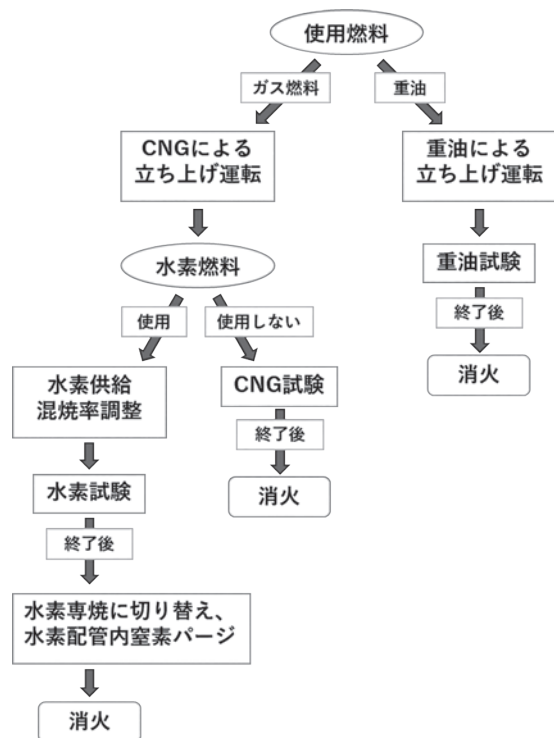
(1) 試験条件

アスファルト混合物製造試験は表—4 に示す 3 種類の燃料を使用し、骨材供給量 5 t/h, 3 t/h の条件で試験を行った。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試験を実施した。

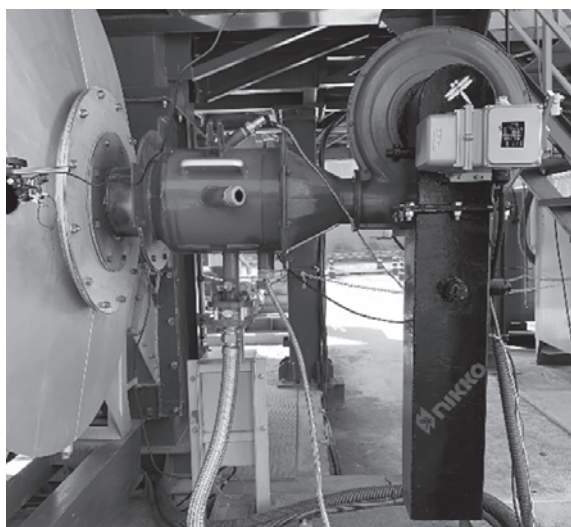
アスファルト混合物製造時の骨材温度調整は骨材温度が 210℃ で安定するように燃料流量を制御しながら骨材乾燥を行った。図—2 に運転方法をフローチャートで示す。

(2) 実験用アスファルトプラント

実験用アスファルトプラントに写真—3 の 500 kW 水素バーナを設置した。そして、使用した実験用アスファルトプラントを写真—4、プラント内ユニット機器の仕様を表—5 に示す。乾燥キルンのサイズはΦ 1,100 mm×3,500 L であり、プラントの骨材乾燥能力は 5 t/h である。水素バーナは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。この水素バーナを実験用アスファルトプラントの重油バーナと入替し、アスファルト混合物製造試験を行った²⁾。



図一 運転方法フローチャート



写真一 水素バーナ



写真二 実験用アスファルトプラント

表一 実験用アスファルトプラント仕様

ユニット名	仕様
ドライヤ	寸法：Φ 1,100 × 3,500 L 能力：5 t/h
バグフィルタ	濾布：72 本 (50m ²)
排風機	風量：90 m ³ /min 静圧：310 mmAq (3.1 kPa)
第一煙道	径：Φ 380

(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, 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実験用アスファルトプラント煙突部の測定孔で表一 6 の項目の測定を行った。

(4) 実験用アスファルトプラント試験結果

(a) 骨材乾燥加熱結果

骨材供給量 5 t/h での各燃料の専焼における骨材乾燥加熱の結果を表一 7 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。

表一 7 に示すように加熱前の骨材含水比は水素専

表一 6 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	—
硫黄酸化物	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

表一 7 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	[℃]	17	16	17
加熱後骨材温度	[℃]	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

表—8 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%
骨材流用	[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
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
排出ガス量 (湿り)	[Nm ³ /h]	2,250	1,970	1,960	1,950	1,930	2,240	1,980
排出ガス量 (乾き)	[Nm ³ /h]	1,950	1,770	1,810	1,790	1,670	2,010	1,780
排ガス水分量	[Vol%]	13.2	10.4	7.9	8.2	13.5	10.3	10.1

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。

(b) 排出ガス測定結果

各条件における排ガス測定結果を表—8 に示す。

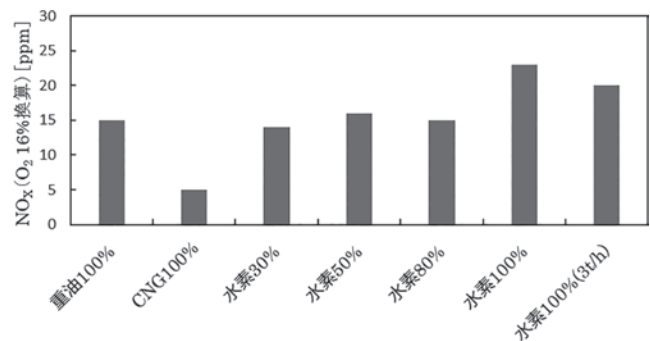
表に示すように CO₂ 濃度は重油専焼時に 4.1%であり、CNG 専焼時は 2.7%と減少していることが確認できた。これは発熱量当たりの CO₂ 排出係数が重油より CNG の方が低いためである。水素燃料の混焼率が高くなるにつれ CO₂ 濃度が減少し、水素専焼の条件では CO₂ は検出されなかった。水素は燃焼時に CO₂ は発生しないため、結果と一致している。

NO_x 濃度を O₂ 濃度 16%で換算した値のグラフを図—3 に示す。AP で水素を使用する場合に懸念点としてサーマル NO_x の増加が挙げられる。大気汚染防止法で骨材乾燥炉の NO_x の排出基準値は 230 ppm 以下となっている⁶⁾。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 23 ppm であり、CNG 専焼の 5 ppm 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—9 に示す。重油や CNG と比べ、水素は燃焼時に燃料由来の水蒸気量が多くなるが、骨材由来の水蒸気量が大半を占める。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が確認できた。

(c) アスファルト混合物の物理性状の検証結果²⁾

アスファルト混合物の物理性状の各検証結果を表—10 に示す。水素専焼は乾燥加熱後の骨材含水比、ホットビンの骨材実測温度、混合物の密度、アスファルト混合物中の水分量、アスファルト混合物実測温度いずれも重油専焼と同程度の結果が得られた。マーシャル安定度、水浸マーシャル安定度のいずれも規格を満足

図—3 NO_x 濃度 (O₂16%換算) 結果

表—9 水蒸気量試算結果

使用燃料	[-]	重油 100%	CNG 100%	水素 30%	水素 50%	水素 80%	水素 100%	水素 100%
骨材供給量	[t/h]	5	5	5	5	5	5	3
骨材含水比	[%]	5.61	3.56	4.09	4.09	3.56	4.09	4.09
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

表—10 アスファルト混合物の物理性状

	[-]	重油 100%	水素 100%	規格値
加熱後骨材含水比	[%]	0.02	0.08	—
骨材実測温度 (1 ビン)	[℃]	176	179	—
密度	[g/m ³]	2.406	2.383	—
マーシャル安定度	[kN]	9.9	10.8	4.9 kN 以上
水浸マーシャル安定度	[%]	94.8	89.4	75.0 以上
混合物の水分量	[%]	0.02	0.02	—
混合物実測温度 (出荷)	[℃]	165	169	160 ± 10

しており、重油専焼と同程度の結果を得られた。

また、施工性の検証はアスファルトフィニッシャとコンバインドローラを用いて施工を行い、通常のアスファルト混合物と同様に施工が可能であることを確認できた。

5. AP 導入に向けた課題と将来展望

500 kW 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水素バーナによる骨材乾燥がアスファルト混合物への影響がないことが分かった。しかし、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に加え、搬送などの技術的な課題も残っている。一般的な AP に用いられるバーナは 5 MW 以上の出力となるため、AP に実装するにはスケールアップが必要となる。

6. おわりに

水素をアスファルトプラントで使用する場合の貯蔵方法や運搬方法を検討し、どのような利用が最も経済合理性が高いかを精査する必要がある。さらには、都市ガスとグレー水素の熱量当たりの単価差が約 20 倍、グリーン水素とグレー水素は約 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。今後、国内のインフラ整備が整ったときには迅速に水素燃料を利用できるように、各機器の設置検討や水素燃料の少量利用からの混焼燃焼利用など、カーボンニュートラルへ向けた運用

計画を検討していく。

J C M A

《参考文献》

- 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) 村本 孝, 上原研二, 今田雄司 「水素燃料によるアスファルト混合物製造の実証試験」, 第 35 回日本道路会議, 東京, 2023 年 11 月
- 3) ENEOS <https://www.eneos.co.jp/business/sds/gasoline/> (参照日 2024 年 1 月 19 日)
- 4) Iwatani <https://www.iwatani.co.jp/jpn/business/energy/basic-knowledge/fuel/> (参照日 2024 年 1 月 19 日)
- 5) 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.
- 6) 環境省 <https://www.env.go.jp/air/osen/law/t-kise-6.html>
- 7) 東京都環境局 https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/air/air_pollution/emission_control/emission_control/Soot_Smoke_NOx.html

〔筆者紹介〕



今田 雄司 (こんた ゆうじ)
日工(株)
開発部 開発 1 課
課長



村本 孝 (むらもと たかし)
前田道路(株)
技術研究所 生産技術開発室
係長