

# 水素バーナの開発 ～Phase 1～

北野 裕樹・今田 雄司

Kitano Yuuki, Konta Yuji

## 概要

温室効果ガスである二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の削減は、国際社会に課せられた喫緊の課題である。2021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。このような社会情勢のなかで、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。そのなかで、燃焼しても二酸化炭素が発生しない水素などの燃料に切り替えることが最も有効な手段であると考えられる。本稿では、アスファルトプラントに適用可能な水素バーナの開発状況について報告する。

## 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、2021年11月にイギリス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をすることを目標として宣言している<sup>1)</sup>。さらに2022年11月にエジプトのシャルム・エル・シェイクで開催されたCOP27ではCOP26での決議内容に対し、国際社会全体で温暖化対策の意識を強めていくことを再確認している。

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注目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がある。国際社会全体でこれらの再生エネルギーを活用する技術の普及を急いでいる。このような動向を鑑みて、当社は化石燃料の代替燃料として注目されている水素やアンモニアなどをバーナで燃焼することに取り組んでいる。本開発は、化石燃料の使用量を削減するために、水素燃焼が可能なバーナを開発することを目的としている。

水素は、燃焼しても二酸化炭素を発生しないカーボンニュートラルな燃料である。しかし、一般的に流通している水素のほとんどは、その製造過程で二酸化炭素を排出している。二酸化炭素を排出しない太陽光や風力などの再生

可能エネルギーを用いて製造した水素を燃料として使用しない限り、カーボンニュートラルを達成することはできない。

アスファルトプラント(以下、APと記述)では、骨材の乾燥加熱に重油や都市ガスを主に使用している。年間骨材出荷量10万tのAPが消費する重油の量は約90万Lに上り、2,440tの二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を排出していることになる<sup>2)</sup>。たとえば、APのバーナ燃料を水素に代替した場合、エネルギー代替率(以下、混焼率)を30%とすると、年間約27万Lの重油と729tのCO<sub>2</sub>を削減することが可能である。

その一方で水素をバーナ燃料として利用した場合、次のような懸念事項が考えられる。①:水素は重油や都市ガスなどに比べて燃焼速度が数倍速いので、バックファイアや異常燃焼を起こす可能性がある。②:水素は、燃焼温度が高いため、サーマルNO<sub>x</sub>(窒素酸化物)の生成量が多くなる。③:水素の火炎は、極めて高温になるため、バーナや燃焼室などの燃焼機器に熱的損傷を与えるおそれがある。

そして、本水素燃焼試験では、実際のバーナで水素を燃焼させることにより、想定される熱出力が得られることを確認し、前述の懸念事項の検証を行うとともに、生成するNO<sub>x</sub>濃度と各種パラメータとの相関関係を明らかにしている。本稿では、APに適用可能な水素バーナの開発状況を報告する。なお、水素バーナの開発は東京ガス株式会社の試験設備を用いて共同で実施した。

## 2. 燃料としての水素

### 2.1 水素の性質

水素は常温常圧では無色無臭の気体であり、分子量2.01588、沸点-252.9℃(常圧)、密度0.0899g/L、比重0.0695である<sup>3)</sup>。また、発熱量は10.8MJ/Nm<sup>3</sup>である。表2-1に主な燃料との比較表を示す<sup>4)</sup>。

表2-1 主要燃料比較表<sup>4)</sup>

燃料	アンモニア NH <sub>3</sub>	プロパン C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	メタン CH <sub>4</sub>	水素 H <sub>2</sub>
大気圧における沸点(°C)	-33.3	-42.1	-161.6	-252.9
20°Cにおける液化圧力(atm)	8.5	8.5	常気体	常気体
低発熱量(MJ/kg)	18.6	48.6	50.2	120.4
可燃当量比範囲(-)	0.63~1.40	0.51~2.51	0.50~1.69	0.10~7.17
最大燃焼速度(m/s)	0.07	0.43	0.37	2.91
発火点(°C)	651	432	537	500
最高断熱火炎温度(°C)	1750	2020	1970	2120

水素は常温では安定であり、フッ素以外とは化学反応を起こさない<sup>5)</sup>。水素は燃焼して酸素と結合し水が発生する。空気中の水素の爆発濃度は4.1~74.2%と広い<sup>3)</sup>という特性を持っている。また、水素は、製造方法の違いにより色で分類された便宜上の呼称を有している。

### 2.2 製造方法の違いによる水素の分類

グレー水素は化石燃料を水蒸気改質反応させて生産する。副産物として大量の二酸化炭素が排出される<sup>6)</sup>。ブラウン水素は石炭から生産される。二酸化炭素が多く排出される。ホワイト水素は他の製品生産時に副産物として生産される。そのため、水素生産量は主生成物の生産量に左右される。

グリーン水素は、二酸化炭素の排出がない再生可能エネルギーから得られる電力を使用して、水の電気分解により生産する。ブルー水素は、グレー水素と同様に化石燃料を水蒸気改質して生産されるが、このときに発生する二酸化炭素を回収処理し、大気中に排出する二酸化炭素を実質ゼロにする<sup>6)</sup>。ターコイズ水素は再生可能エネルギーを使用し、メタンの熱分解によって生成する。メタン由来の炭素は固体として生産されるため、二酸化炭素は排出されない。生産された炭素は永久に封じ込める必要がある。イエロー水素は原子力発電の電力を用いて、水を電気分解して生産される。このようにして、水素をカーボンニュートラル燃料として使用する場合は、二酸化炭素を排出しない方法で生産された水素を使用する必要がある。

図2-1に日本の水素生産拠点を示す<sup>7)</sup>。図より、重化学工業地帯に集中している。そこからローリー車等で通行可能な地域であれば水素の供給は比較的容易であると推測される。



図2-1 日本の水素製造拠点

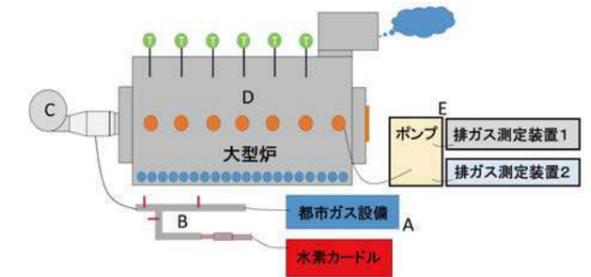


図3-1 試験設備フロー図

## 3. 水素燃焼試験

### 3.1 試験設備

図3-1は、水素バーナの試験設備のフローである。図より、Aは水素カードと都市ガス供給設備、Bは電磁弁ユニット、Cは水素バーナ、Dは燃焼炉、Eは排ガス測定装置である。燃焼炉には温度計を設置し、炉内の温度分布がわかるようにしている。排ガス測定装置は、酸素(O<sub>2</sub>)、一酸化炭素(CO)、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、一酸化窒素(NO)、亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)、窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)等の濃度を測定する。

実験機では燃焼機器の安全を確保するために配管の火炎の逆流を防止する装置をつけている。

#### 3.1.1 水素バーナ

水素バーナの外形を写真3-1に示す。写真より、本水素バーナのガス流路は、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ラインと安定燃焼を維持するメインガスラインに分かれている。着火に使用するパイロットガスラインでは安全のため都市ガスを使用している。都市ガスと水素はバーナのメインガスラインに入る前に混合される元混合方式を採用する。将来的には水素専焼バーナを想定しているが、現時点では水素と都市ガスの混焼での運用が主要になると考え、バーナ自体は一つのメインガスラインにてどちらの燃料も燃焼可能とする。燃焼用空気はバーナの後方から供給される。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。また、バーナには火炎を検知するためのセンサもついている。特殊ノズルにより噴射された燃料ガスはスロート部分にて空気と混合しながら燃焼する。

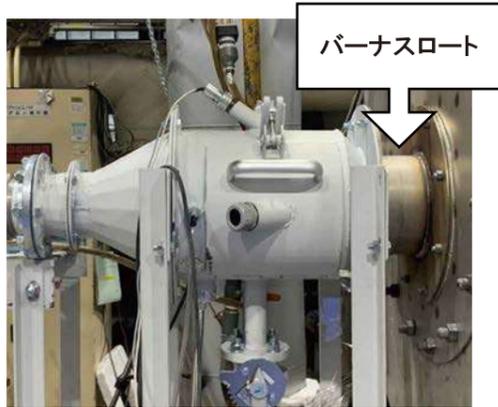


写真3-1 水素バーナ

表3-1 水素カードル仕様

水素カードル仕様	
内容	圧縮水素
充填圧力	19.6 MPa
容量	300 Sm <sup>3</sup>
ポンベ本数	30 本

表3-1に今回使用した水素カードルの仕様を示す。写真より、水素カードルは水素ポンベ複数本を1つにまとめたものである。運搬効率を高めるために高圧で水素が充填されている。今回、水素カードルを減圧弁に接続し、水素を減圧してから電磁弁ユニットに供給している。

### 3.1.2 電磁弁ユニット

試験で使用した電磁弁ユニットを写真3-2に示す。写真より、都市ガスのラインでは流量計、電磁弁、ボールバルブがあり、流量調整を手動で行う。水素のラインでは、カードルから減圧された水素が供給され、あらかじめ入力設定した流量値に調節することができる流量調節装置が設置されている。都市ガスラインと水素ラインは下流側で合流し、都市ガスと水素を混合してから水素バーナのメインラインに供給している。さらに都市ガスラインはパイロットラインに供給できるように分岐している。



写真3-2 電磁弁ユニット

### 3.1.3 水素カードル

試験で使用した水素カードルを写真3-3に示す。



写真3-3 水素カードル

### 3.1.4 試験炉

試験で使用した燃焼炉を写真3-4、写真3-5に示す。燃焼炉は比較のため、中型と大型の2種類を使用した。中型燃焼炉は約500kWのバーナ試験に適した容量であり、断熱、保温のために内面キャスト施工をしている。中型燃焼炉内部には排ガス温度を下げるために空冷管が設置されている。炉の内部の温度分布を測定するために熱電対が15本(幅方向3列×全長方向5列)設置されている。大型燃焼炉は約800kW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施工をしている。また、排ガス温度を下げるために水冷管が炉内に設置されている。大型燃焼炉には熱電対が30本(幅方向5列×全長方向6列)設置されている。中型炉に対する大型炉の容量比はおよそ2.3倍である。

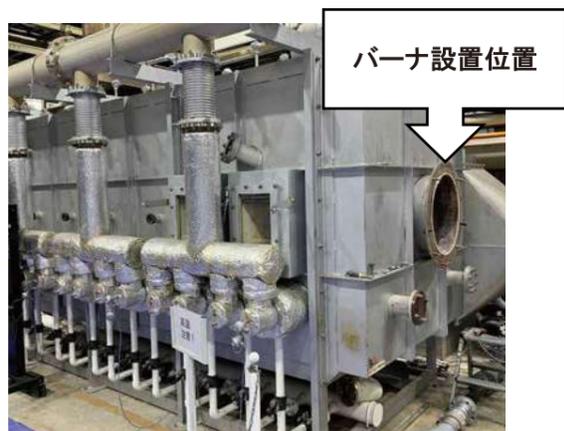


写真3-4 中型炉

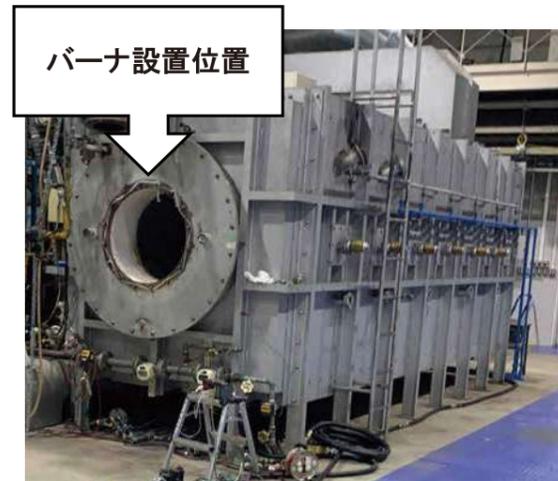


写真3-5 大型炉

### 3.1.5 排ガス測定装置

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

表3-2 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 <sub>2</sub>
測定方式②	非分散型赤外線方式
測定ガス②	CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>
測定方式③	低電位電解式
測定ガス③	CO, NO, NO <sub>2</sub>

表3-3 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 <sub>2</sub> O
測定方式②	磁気式
測定ガス②	O <sub>2</sub>

### 3.2 試験方法

下記のパラメータにて試験条件を設定した。

- ・炉の大きさ
- ・燃料種類(都市ガス, 水素)
- 熱出力を合わせるため、都市ガス専焼では都市ガス44.4Nm<sup>3</sup>/h、水素専焼では水素167.0Nm<sup>3</sup>/hにて試験を行った。
- ・AP想定空気比
- ・バーナパーツ組み合わせ

### 3.3 試験結果と考察

#### 3.3.1 パーツ比較試験

この項目ではこれまで試したパーツの組み合わせパターンの中から、現時点で最適な条件(パターン30)と当社標準品に近いもの(パターン19)を比較する。パターン30では、水素燃焼時のNO<sub>x</sub>を低下させるために、局所的高温部分が減少するように設計されている。

図3-2、図3-3はそれぞれパターン19とパターン30の混焼率に対するNO<sub>x</sub>値のグラフである。排ガス測定器の誤差などの影響を考慮するためにNO<sub>x</sub>値は酸素濃度16%換算している。それぞれのパーツの都市ガス専焼と水素専焼を比較する。図3-2の方が図3-3よりも空気比が低い条件である。

どちらのパーツにおいても都市ガスよりも水素の方がNO<sub>x</sub>が高くなることが確認された。これは、都市ガスよりも水素の方が燃焼速度が速く、局所的高温部分ができることにより、サーマルNO<sub>x</sub>が増加することによる影響と推測される。また、当社標準品に近いパターン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<sub>x</sub>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、局所的高温部分を減らすように設計しているため、その影響によりサーマルNO<sub>x</sub>が減少したものと推測される。

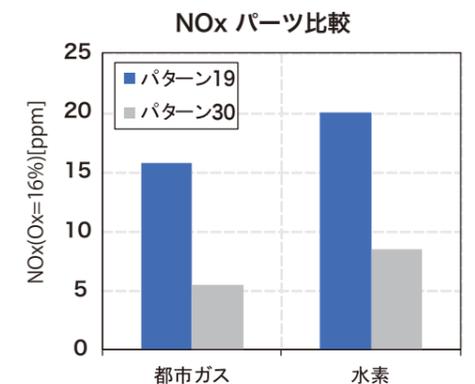


図3-2 パーツ比較 空気比A NOx

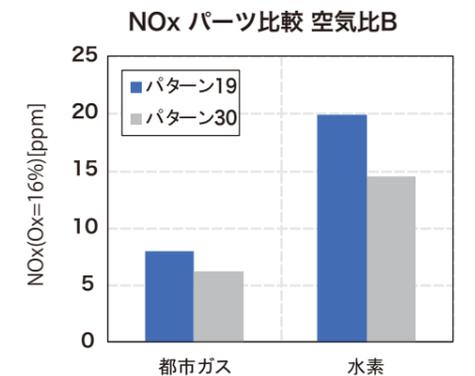


図3-3 パーツ比較 空気比B NOx

3.3.2 燃焼炉比較試験

熱出力、空気比、構成パーツなどの燃焼条件を固定して、サイズが異なる炉の比較試験を行っている。この試験により、炉の熱容量が異なることが各種測定データに及ぼす影響度合いを確認している。

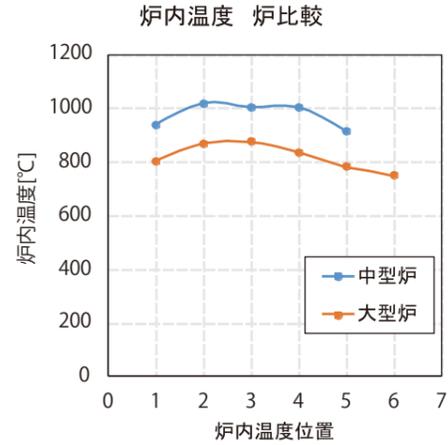


図3-4 炉比較炉内温度

図3-4は、大と中の炉で都市ガスを44.4Nm<sup>3</sup>/h燃焼させたときの炉内温度の分布を示している。なお、横軸の炉内温度位置は、バーナからおおよその距離(m)を示している。

図より、中型炉よりも大型炉の温度が全体を通じて低くなっている。これは、炉の容積が約2.3倍大きいことで熱容量に差が生じたことに起因しているものと考えられる。APの骨材乾燥ドライヤの場合、ドライヤ本体は保温されておらず、また常に骨材と熱交換されるので、炉内温度は更に低くなると思われる。

図3-5は写真3-1に示すバーナスロート部の温度分布を示している。なお、横軸のスロート位置は、上面部から下面部に至る温度測定位置を示している。とくに、バーナのスロート内部は、燃料の一部が燃焼しファイアーボールを形成する箇所であり、燃焼状態が悪化すると、スロートに熱損傷が起こる可能性がある。図より、スロート部の温度は、炉内温度の場合と同様に中型炉よりも大型炉の温度が低い結果となっている。このことから、バーナスロート部が炉内からの輻射の影響を強く受けていることが推察される。ただし、輻射伝熱は、温度差の4乗に比例することが知られていることから、現実のAPのドライヤにおいては、温度レンジが更に低下するので輻射の影響は極めて弱くなるものと考えられる。したがってAPで使用する場合は大型炉よりもさらに熱損傷の可能性が低くなると思われる。

図3-6にはそれぞれの炉で都市ガス44.4Nm<sup>3</sup>/hを燃焼させたときのNO<sub>x</sub>値を示している。AもBも空気比は1以上であ

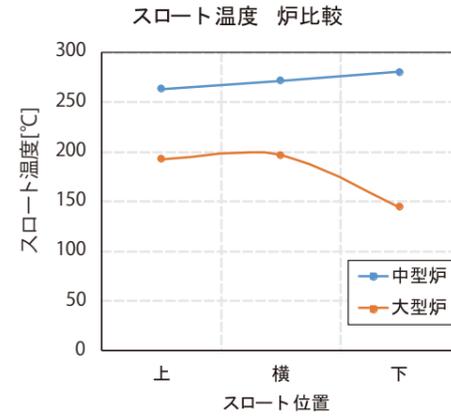


図3-5 炉比較スロート温度

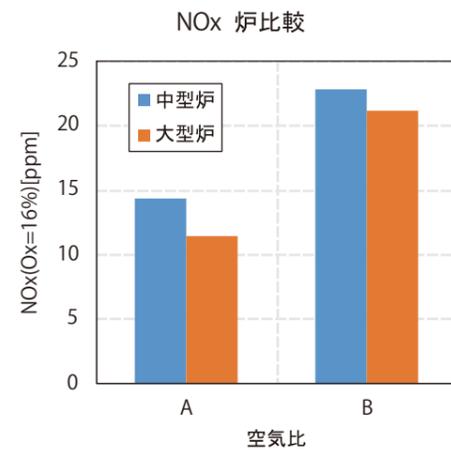


図3-6 炉比較NOx

る。AはBよりも空気比が低い。

図に示すように、どちらの空気比においても大型炉よりも中型炉のNO<sub>x</sub>が高くなった。炉内温度は大型炉よりも中型炉の方が高いため、サーマルNO<sub>x</sub>の影響によるものと考えられる。また、空気比が高いBの方が、空気比が低いAよりもNO<sub>x</sub>が多量に発生している。これは空気比の増加により、炉に侵入する窒素が増加した影響と推測される。また、空気比が高いBの方が酸素量が多いので高速燃焼となり、局所的な高温部分が増大したと考えられる。大気汚染防止法では、NO<sub>x</sub>の排出基準値は230ppmであるが<sup>8)</sup>、都市部ではさらに厳しい基準(25ppm:東京都23区)が設けられている<sup>9)</sup>。今回の結果ではどちらの条件であってもNO<sub>x</sub>値は25ppm以下となり、良好な結果といえる。

これらの結果より、本バーナを都市ガス燃料においてAPのドライヤで使用する場合は、本試験での炉内温度よりも低い雰囲気温度で運用するため、さらにNO<sub>x</sub>が低下すると推測される。前項により、都市ガス燃焼よりも水素燃焼の方がNO<sub>x</sub>発生量が多くなることが確認されたが、大型炉におけ

る水素燃焼によるNO<sub>x</sub>値が約20ppmであり、APではさらにNO<sub>x</sub>が減少すると思われるため、NO<sub>x</sub>規制値の厳しい地域でも使用できる可能性が高いと推測される。

4. 今後の予定

- ・水素バーナにてアスファルト合材製造試験を行い、バーナと合材の評価を行う。
- ・一般的なAPに用いられる5MW～10MW以上の出力に対応する水素バーナを開発する。

5. 結言

- ・二酸化炭素削減を目的として、都市ガス、水素両方を熱源としたバーナを開発した。
- ・熱量500kWクラスのバーナで都市ガスと水素の燃焼試験を行った。
- ・都市ガス、水素どちらの燃焼においても、バーナ本体に熱損傷がないことを確認し、両方の燃料を燃焼可能であることを確認した。
- ・水素のみならず都市ガス燃焼においてもNO<sub>x</sub>排出が少ないパーツの組み合わせを発見した。
- ・炉の比較により、さらに熱容量の大きなAPのドライヤでもNO<sub>x</sub>が問題無い可能性があることを確認した。

References

- 1) 環境省  
<https://www.env.go.jp/earth/26cop2616cmp16cma10311112.html>
- 2) 経済産業省・環境省  
<https://www.env.go.jp/council/16pol-ear/y164-04/mat04.pdf>
- 3) 化学工業日報 1996, pp. 233-234, 水素.
- 4) 日本燃焼学会  
 Journal of the Combustion Society of Japan. Vol.58 No.183 (2016) 41-48
- 5) Lee, J. D. 著, 浜口博, 菅野等 訳「3. 元素の一般的性質 水素」『無機化学』東京化学同人, 1982年4月, 119-123頁. ISBN 4-8079-0185-0.
- 6) ドイツ連邦経済エネルギー省  
 FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND CLIMATE ACTION (2020-06). The National Hydrogen Strategy (Report). pp. 28.

- 7) 株式会社 谷グリーンエネルギー研究所  
[https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/ki/renkei/ud49g7000000keer-att/H27\\_2\\_09.pdf](https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/ki/renkei/ud49g7000000keer-att/H27_2_09.pdf)
- 8) 環境省  
<https://www.env.go.jp/air/osen/law/t-kise-6.html>
- 9) 東京都環境局  
[https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/air/air\\_pollution/emission\\_control/emission\\_control/Soot\\_Smoke\\_NOx.html](https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/air/air_pollution/emission_control/emission_control/Soot_Smoke_NOx.html)

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