

工業炉における脱炭素燃焼技術の開発動向

友澤 健一*
服部 成真**

1. はじめに

工業炉における高温加熱プロセスは、あらゆる産業の製造現場において必要不可欠なプロセスである一方、大量の化石燃料が消費されている。工業炉とは、主として鉄鋼、自動車、電気、電子、窯業、化学工業及び環境関連の産業分野で、材料や部品の物理的・化学的・機械的性質を加熱によって変化させるための加熱設備の総称である。日本では現在、約40,000基の工業炉が稼働しており¹⁾、国内総排出量の約17%※を占める二酸化炭素排出源となっている。工業炉は加熱方式によって電気式工業炉と燃焼式工業炉に分類される。前者の熱源がヒーター加熱なのに対して、後者の熱源はバーナでの化石燃料の燃焼による加熱が大半を占める。燃焼式工業炉からは年間およそ6,600万トン(約6.2%※)の二酸化炭素が排出されている。日本における2050年のカーボンニュートラル実現に向けて、産業界の脱炭素化対策が急速に進むと予測されるなか、工業炉分野においても化石燃料依存からの脱却に挑戦する意義は大きい。

中外炉工業株式会社は、工業炉及び工業用バーナの総合エンジニアリングメーカーである。バー

ナとは、燃料を燃焼させて熱エネルギーを発生させる機器のことで、一般的な化石燃料系ガスや油が使用されることが多い。一方で、製鉄所や化学プラントなどで発生する副生ガスなど発熱量が低い難燃性のガスや油も燃料として使用されることもある。当社では様々な燃料の燃焼技術を有しており、創業以来、省エネ型バーナや低NO_xバーナ、さらに近年では水素バーナやアンモニアバーナの開発に取り組むなど、時代のニーズに呼応する開発及び製品化実績を有し、工業炉における省エネルギー化や脱炭素化に貢献してきた。

※ 一般社団法人日本工業炉協会集計による国内工業炉における2018年度の燃料消費量統計データをもとに、当社が算出した数値である。

2. 最近の脱炭素化の流れとカーボンフリー燃料について

日本においては、2020年10月の菅元首相による『2050年カーボンニュートラル』宣言に続き、2021年4月には2030年までの温室効果ガス削減目標が当初の26%から46%削減(2013年度比)

* 中外炉工業株式会社 商品開発部 部長 K. Tomozawa 連絡先 E-Mail : Shigemasa_Hattori@n.chugai.co.jp

** 同 同 開発探索課 課長補佐 H. Shigemasa

に引き上げられた。一方、海外においても、米国、EU、英国、韓国などが2050年、中国が2060年までのカーボンニュートラル達成を表明している。目標達成に向けては、既存の省エネ化・低炭素化技術のブラッシュアップだけでは不可能であり、ブレークスルーとなる技術革新が必要不可欠であることから、燃焼を伴う加熱プロセスにおいては、燃焼時にCO₂を排出しないカーボンフリー燃料燃焼技術への社会ニーズは今後一層高まることが予測される。

カーボンニュートラルの達成には、電力の脱炭素化が必要となる。電力の脱炭素化には再生可能エネルギーの利活用が重要な鍵となるが、現在の国内における火力発電由来の電力を再生可能エネルギーで賄うことは困難である。そこで再生可能エネルギー由来の電力を貯蔵・運搬出来るエネルギー形態として水素が注目されている。

水素はその製造方法により、グレー、ブルー、グリーンなど色分けされる。従来の製造方法である、天然ガス等の水蒸気改質法で製造される水素をグレー水素と呼ぶ。水蒸気改質での水素製造時に発生する大量の二酸化炭素を、地下深くに貯蔵(CCS: Carbon dioxide Capture and Storage)、あるいは化成品や炭酸ガス、燃料等の原料として有効利用(CCU: Carbon dioxide Capture and Utilization)することで、大気中への排出を抑制しているとみなすブルー水素。再生可能エネルギー由来の電力を利用して、水電解により得られた水素をグリーン水素と呼び、ブルー、グリーンに関しては、カーボンフリー水素と呼ぶこともある。

水素エネルギーの利用拡大に向けて国際的な水素サプライチェーンを構築するうえで、水素の運搬方法が最大の課題となる。海外で製造した安価なカーボンフリー水素を日本にタンカー輸送する際、ガス状態では非常に効率が悪い。そのため水素ガスを液化水素、有機ハイドライド、液体アンモニアなど運搬に適した形態に変える必要があり、これらは水素エネルギーキャリアと呼ばれている。アンモニアは約100年前にドイツで発明されたハーバー・ボッシュ法による大量製造技術に加え、大量輸送及び貯蔵技術が確立されており、また単位体積当たりの水素貯蔵能力が高いことから、有望な水素エネルギーキャリアと言える。さらには、水素同様、燃焼時にCO₂を排出しない

カーボンフリー燃料であることから、アンモニアの燃焼技術開発に注目が集まった。戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第一期(2014～2018年度)においては火力発電、工業炉、船舶などにおけるアンモニアの燃料利用を目指した研究開発が行われ、燃料アンモニアの実用化に向け大きく前進した(図1、表1)。

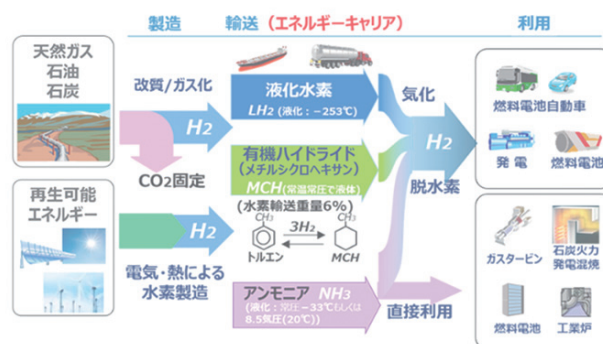


図1 水素エネルギーキャリア²⁾

表1 水素エネルギーキャリアの特性³⁾

	液化水素	有機ハイドライド(MCH)	アンモニア	メタネーション
体積(対常温常圧水素)	約1/800	約1/500	約1/1300	約1/600
状態・毒性	液体(-253℃、常圧) 毒性無	液体(常温常圧) トルエンは毒性有	液体(-33℃、常圧等) 毒性、腐食性有	液体(-162℃、常圧) 毒性無
高純度化*	高純度化が容易 (追加設備不要)	高純度化には追加設備が必要		
特性変化時の消費エネルギー(水素比率)	現在:25-35% 将来:18%	現在:35-40% 将来:25%	水素化:7-18% 脱水素:20%以下 ※将来はデータ無し	現在:~32% ※反応熱の有効利用で引き下げ余地有
技術的成熟度	国際運搬用の、大規模液化機、運搬船等は要技術開発 ・ 液化水素ローリー等の国内運搬設備は現在も利用し成熟	・ 水素化・脱水素プラントは今年度で実証完了 ・ 国内外運搬には既存インフラ利用可能	・ 脱水素設備以外成熟 ・ 国内外の既存リブライチェーン利用可能	・ 国内外で実証試験が実施 ・ 国内外の既存リブライチェーン利用可能

なお、ブルー水素、グリーン水素から合成したアンモニアをそれぞれブルーアンモニア、グリーンアンモニアといい、水素同様、両者をカーボンフリーアンモニアと呼ぶこともある。

2020年12月に経済産業省より発表された『2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略』においても、水素及びアンモニアは2050年のカーボンニュートラル実現に向けた14の重要実施項目の一つに挙げられている。国内における将来的な海外産カーボンフリー水素供給量は2030年に最大300万トン/年、2050年に2,000万トン/年程度が想定されている。一方アンモニアに関しては、2021年2月公表の『燃料アンモニア導入官民協議会 中間とりまとめ』において、2030年には国内で300万トン/年、2050年には3,000万トン/年の海外産カーボンフリーアンモニア導入が想定されており、多用途での展開が期待できる。

表 2 に一般的な工業用燃料である都市ガス 13A の主成分であるメタン、プロパン、水素及びアンモニアの物性値を示す。化石燃料と比較して、水素は燃焼速度が速く、火炎温度が高いことから、非常に燃えやすい燃料と言える。一方、アンモニアは燃焼速度が遅く、火炎温度が低いため、非常に燃えにくい燃料である。このため、同じカーボンフリー燃料でも安定燃焼に求められる燃焼方法は両者の間で大きく異なる。

当社における水素及びアンモニア燃焼技術開発については第 4 章、第 5 章にて解説することとし、次の第 3 章では、これまでも取り組まれている工業炉の低炭素化に貢献する省エネ型バーナ（リジェネレイティブバーナ、ラジアントチューブバーナ）を紹介する。両バーナは様々な工業炉で広く使用されており、後述するアンモニア燃焼技術開発においても、適用に向けた開発検討が行われている。

表 2 化石燃料と水素、アンモニアの物性値比較⁴⁾

燃料種	アンモニア NH ₃	プロパン C ₃ H ₈	メタン CH ₄	水素 H ₂
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	46.6	50.2	120.4
可熱当量比範囲 (-)	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
最低着火温度 (°C)	651	432	537	500
最高断熱火炎温度 (°C)	1750	2020	1970	2120

3. 省エネ型バーナ

3.1 リジェネレイティブバーナ

リジェネレイティブバーナ（以下、リジェネバーナ）とは、2 台のバーナを 1 ペアとして所定のサイクル時間で交互に燃焼させる直接加熱式のバーナである（図 2）。それぞれのバーナは蓄熱器を有しており、一方のバーナが燃焼している間、他方のバーナは高温になった炉内の燃焼排ガスを吸引して蓄熱器にその熱を蓄える。燃焼させるバーナは凡そ 60 秒ごとに切り替わる。このような燃焼方法を交番燃焼と呼ぶ。燃焼させるバーナが切り替わると、蓄熱器を通過する燃焼空気が、燃焼排ガス温度と同等の高温まで予熱されることで、燃焼排ガスが含有する熱エネルギーを効率よく回収・利用できる仕組みとなっている。この燃焼サイクルを繰り返すことで、従来の空気燃焼式汎用

バーナと比較して 50%以上もの省エネ効果が期待できる。このバーナは主として鉄鋼加熱炉や鍛造炉、アルミ溶解炉など、比較的規模の大きな工業炉に適用される。

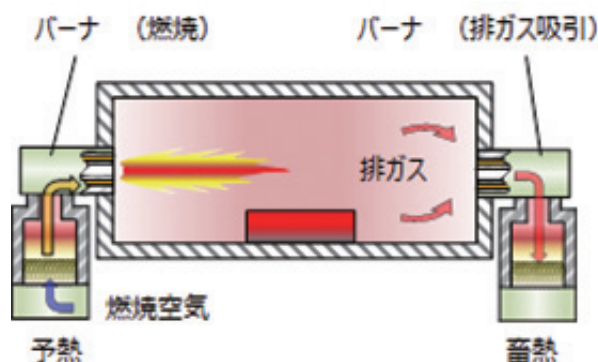


図 2 リジェネバーナ

3.2 ラジアントチューブバーナ

リジェネバーナが火炎からの輻射や排ガスの対流等で、炉内を直接的に加熱する方法なのに対して、ラジアントチューブバーナは、チューブ内における燃焼によりチューブ外面からの輻射熱を利用して炉内を間接的に加熱するため、炉内の雰囲気気を自由に選択することが可能である（図 3）。このバーナは主に連続ガス浸炭炉（Continuous Gas Carburizing Furnace : CCF）や窒化炉といった熱処理設備、冷延鋼板連続焼鈍設備（Continuous Annealing Line : CAL）や連続亜鉛メッキライン（Continuous Galvanizing Line : CGL）など大型鉄鋼プロセス炉などに適用される。

また、高効率レキュペレーターを排ガス出口側に設置し、高温の燃焼排ガスと常温の燃焼空気の間で熱交換を行うことで、10～25%の省エネ効果が期待できる。一方で、燃焼空気温度の上昇は、火炎温度上昇を促進し、NO_x 発生量の増加につながる。この課題に対して、燃焼空気に排ガスの一

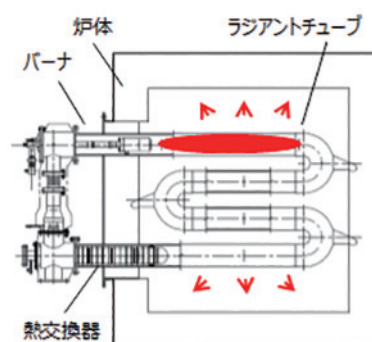


図 3 ラジアントチューブバーナ

部を混合させて、酸素濃度を低下させる排ガス再循環（EGR=Exhaust Gas Recirculation）を行うことでNOx発生量を低減させることが可能となる。

4. 水素燃焼技術

本章では当社の水素バーナ（HSGB型ハイスピードガスバーナ：2018年 トヨタ自動車（株）共同開発）を概説する。

4.1 水素バーナの開発

水素は燃焼時に二酸化炭素を排出しないカーボンフリー燃料であることから、当社では工業炉の脱炭素化を目指した水素燃焼技術の開発を2016年より開始した。水素を工業用バーナの燃料として適応させるための技術課題として、安全面への配慮とNOx対策が挙げられる。水素は広い可燃範囲をもち、反応性に富んだ燃料であることから、燃焼反応を安定させやすい反面、燃焼速度が極めて速く逆火が起こりやすい。また、NOxは主に空気中の窒素と酸素が高温で反応することで生成され、火炎の温度が高いほどNOx発生量は増加する（サーマルNOx）。水素は燃焼速度が速いことから局所的な火炎温度上昇により、NOx発生量が多くなりやすい。

これらの特性を踏まえて、水素燃焼に適した工業用バーナとして、燃料をノズルから吐き出された後に空気と混合させ燃焼させるノズルミックス式バーナを選定した。ノズルミックス構造では燃料と空気が別々に供給されるため、逆火が起こりにくい。また工業用バーナは通常、不完全燃焼によるすすや一酸化炭素の発生、失火を防ぐためにノズルにおける燃料の吐出方向を空気と直交させ、積極的に混合できる構造となっているが、水素燃焼においては、混合が過剰に促進され、急激な燃焼とそれに伴う火炎温度上昇により、NOxの発生量の増加や部品の焼損が起こる。そこで、図4に示すように、水素と空気を緩慢に混合できる

構造に改良することで、急激な燃焼反応を抑制し、火炎温度のピークを下げ、NOx発生量を都市ガス13A燃焼時と同等レベルにまで低減にさせるとともに、バーナ部品の焼損も解消した。

水素バーナの工業分野への普及に向けて、様々な用途の工業用バーナにて水素化を進めている（写真1）。汎用性が高く、あらゆる炉にご利用頂けるHSGB型ハイスピードガスバーナ（左）のほかに、自動車用塗装乾燥炉に多くの実績のある低温オープン向けの多段燃焼バーナであるDGB型ダブルコンバーナ（中央）、燃焼管を加熱し、放射熱を利用して炉内を加熱するCRB型コンセントリックラジエントチューブバーナ（右）などが水素バーナ化可能な商品のラインナップとなる。また、2022年4月より当社堺事業所（大阪府堺市）構内にCRB型よりも容量の大きい、W型及びU型のラジエントチューブバーナを搭載した、水素燃焼デモ試験機を展示しており、多くのユーザー様に見学頂いている。今後も工業炉の脱炭素化を目指して、水素バーナの開発を進め、顧客のニーズに応じたラインナップを増やしていく予定である。



写真1 水素バーナ商品ラインナップ

4.2 水素バーナ燃焼時の安全対策

工業用バーナにて水素燃焼させるにあたり、最も注意が必要となるのが、逆火である。燃料をノズルから吐き出された後に空気と混合させ燃焼させるノズルミックス構造を採用することで、逆火の可能性は低くなっているが、立ち上げ時等の水素配管に空気が混在した状態でバーナを点火すると、水素の燃焼速度が極めて速いことから火炎が配管まで戻る逆火が発生する。また消火後においても、ノズルのガス吐出口から空気が水素配管内に入り込み、水素と空気が混在した状態になり、高温となった炉内の雰囲気やノズル温度を着火源として、配管内燃焼が発生することもある。こういった逆火、配管内燃焼を防ぐために、点火前、消火後には不活性ガスである窒素パージの実施を必須とした。点火時には、水素配管内の空気を窒

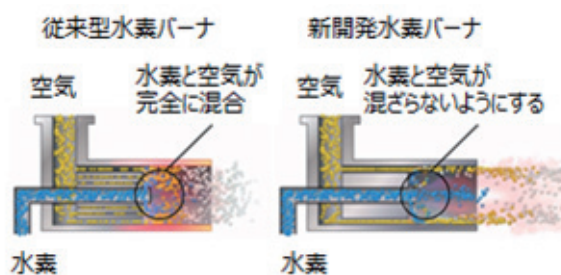


図4 水素バーナ燃焼模式図⁵⁾

素で置換してから水素を流し、また消火時には、水素配管内へ窒素を導入して置換しておくことで、水素と空気の混在が起こらないようにした。

なお、2022年9月現在、水素ガス燃焼設備の安全に関する法規・指標は整備されていない。したがって、工業炉への広範な水素バーナの適用を進めるには、今後、安全技術指標や燃焼安全規格等において既存の化石燃料と同等の安全指標整備が必要と考える。

5. アンモニア燃焼技術について

アンモニア利用による脱炭素化の機運が高まりを見せるなか、当社では2019年より工業用アンモニアバーナの開発に着手した。本章では、当社の開発コンセプト及びこれまでの成果を中心に、2021年度より実施中の国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）における研究開発の概要を紹介する。

5.1 アンモニアバーナの開発コンセプト

戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第一期（2014～2018年度）では、工業用バーナ開発において、アンモニア燃焼技術の課題克服に向けて、燃焼空気中の酸素濃度を高めた酸素富化燃焼技術を用いた化石燃料との混焼技術等の開発が行われた。しかし、化石燃料との混焼は工業炉の低炭素化に寄与するものではあるが、日本が2050年の達成を目指すカーボンニュートラルには専焼技術が必要になってくる。また、酸素富化燃焼は、酸素製造にコストが掛かるため、経済性の観点から多用途での社会実装において障壁になる可能性がある。

そこで当社では、アンモニア燃料利用による工業炉の脱炭素化を早期実現させるためには、これまで検討されてきた二酸化炭素排出を伴う化石燃料との混焼や高コストの酸素富化燃焼ではなく、空気とアンモニアのみによる汎用的なアンモニア専焼技術の確立が必要であると考えた。

5.2 アンモニア燃焼における課題

アンモニアを工業用バーナの燃料として適応させるための技術課題として、点火性・燃焼安定性の確保、低NO_x化及び、未燃アンモニア対策が挙げられる。

先述のとおり、アンモニアは既存の化石燃料

と比較して、非常に燃やしにくい燃料である。したがって、バーナ構造を検討する際は、水素とは真逆の発想、すなわち空気と燃料であるアンモニアを積極的に混合させる燃焼法の検討が必要となる。また、燃焼過程において生成する環境に有害なNO_xには、燃焼空気中に含まれる窒素と酸素が高温状態で反応にすることで生成するサーマルNO_xと、燃料成分中の窒素分が酸化して生成するフューエルNO_xが存在する。アンモニア燃焼においては、サーマルNO_xに加えてフューエルNO_xも生成するため、窒素分を含まない従来の化石燃料に比べてより高度な低NO_x燃焼技術が求められる。さらに、アンモニアは臭気強く、悪臭防止法に基づく特定悪臭物質の一つとして、大気への放出は厳しく規制されていることから、燃焼排ガス中の未燃アンモニア除去が必要となる。

5.3 これまでの成果（大阪大学共同開発）

当社では2019年に、国立大学法人大阪大学・赤松史光教授らの研究グループとともに、工業炉におけるアンモニア専焼技術開発を開始した。試験には大阪大学が所有する100kWアンモニア燃焼試験炉を使用した（写真2）。アンモニア専焼バーナの開発にはこれまで当社が培ってきた製鉄所などで使用されている高炉ガス（Blast Furnace Gas：BFG）や転炉ガス（Linz-Donawitz converter Gas：LDG）といった低発熱量燃料の副生ガス燃焼技術を応用した。具体的な手法として、燃焼空気または燃料であるアンモニアに旋回をかけることで、空気とアンモニアの混合を促進させ、さらにNO_x対策として二段燃焼法などを最適条件にて組み合わせることで、アンモニア専焼により、以下の成果を得ている。

- ・常温での直接点火が可能
- ・実炉稼動温度である1,200℃まで昇温が可能
- ・都市ガス13Aと同等レベルの低NO_x燃焼が可能

上記を達成できる燃焼条件は限定された範囲であったことから、汎用的なアンモニア専焼技術の実用化に向けた課題の抽出を行ったうえで、その克服を目指し開発方針の整理を行っている。

なお、2022年9月現在、水素同様、アンモニアガス燃焼設備の安全に関する法規・指標は整備されておらず、こちらも、安全技術指標や燃焼安全規格等において既存の化石燃料と同等の安全指

標整備が必要と考える。

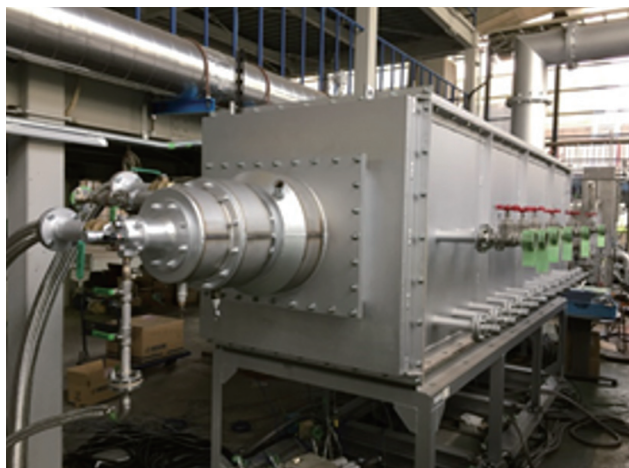


写真2 100 kW アンモニア燃焼試験炉

5.4 NEDOにおける研究開発概要の紹介

工業炉におけるアンモニア専焼技術の実用化に向けた取り組みとして、当社では現在、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）による補助の下、「NEDO 先導研究プログラム／エネルギー・環境新技術先導研究プログラム」において『革新的アンモニア燃焼による脱炭素工業炉の開発』を実施している。

国立大学法人大阪大学・赤松史光研究室及び国立大学法人東京大学・鈴木雄二研究室とともに、国内外の工業炉において広範な適用が見込まれるラジアントチューブバーナ及びリジェネバーナを対象に2021～2022年度までの2年間で、アンモニア燃焼における課題の克服を目指すとともに、2023年度以降の社会実装に向けた更なる研究開発を計画している。

写真3に一年目（2021年度）に開発したラジアントチューブバーナ燃焼試験炉を示す。炉内にてバーナを燃焼させる直接加熱式のバーナと異なり、直径百数十mmのチューブ内という限られたスペース内でのアンモニア専焼はハードルが高かったものの、様々な角度からの検証を重ねることで排ガス中のNO_x及び未燃アンモニアの低減にも成功し、安定燃焼化への目途が立ちつつある。取り組んだ課題や検討手法、試験内容及び成果の詳細は、現在開発実施中であることから、ここでの紹介は控えさせていただく。また、リジェネバーナにおけるアンモニア専焼技術開発に関しては2022年度より実施中である。

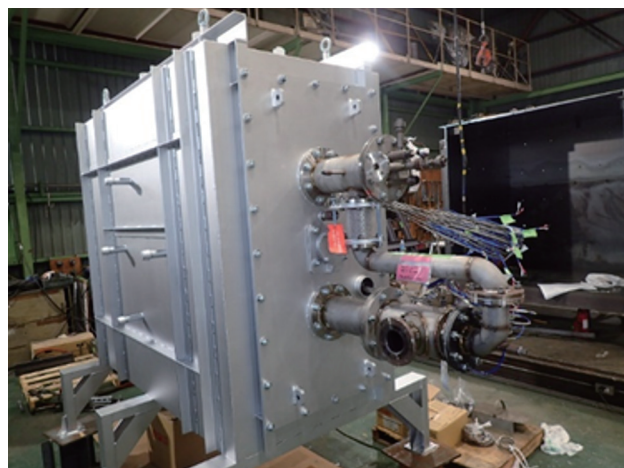


写真3 アンモニア燃焼式ラジアントチューブバーナ燃焼試験炉

5.5 微粉炭焚ボイラ向けバーナへの応用展開

さらに当社では、石炭火力発電所の微粉炭焚ボイラ向け大容量アンモニア専焼バーナ開発をスタートさせた。これに関しては、NEDO「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／アンモニア混焼火力発電技術開発・実証事業／要素研究／火力発電所でのCO₂フリーアンモニア燃料利用拡大に向けた研究開発」において、電源開発株式会社、一般財団法人電力中央研究所、国立研究開発法人産業技術総合研究所、大阪大学赤松研究室とともに2021年～2023年度までの3年間で実施中である。石炭火力発電所から発生する二酸化炭素量は、図5に示すように国内総排出量の約25%を占めており、アンモニア利用による低炭素化技術開発に関するNEDOプロジェクトが複数立ち上がるなど、国の支援を得ながらの社会実装に向けた研究開発や実証が活発に進められている。

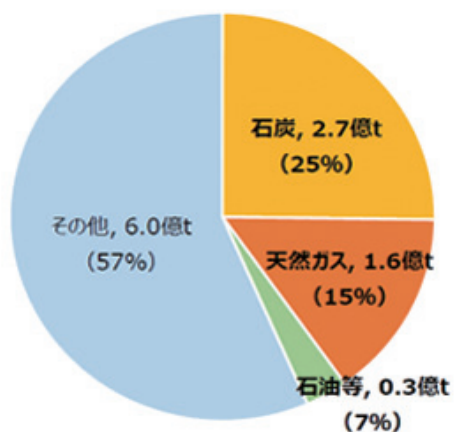


図5 石炭火力発電所からの二酸化炭素排出量（2018年）⁶⁾

本事業の開発概要を図6に示す。当社は、工業用に開発したアンモニア専焼バーナの発電ボイラへの適用化とスケールアップを行い、バーナ専焼試験を行う。続いて試験ボイラにて、アンモニア専焼バーナと微粉炭バーナ併用における炉内混焼時の最適条件を検証する。そこから得られた結果と、実機ボイラ内での混焼シミュレーション結果をもとに、実機ボイラにおける炉内混焼時の最適条件を検証する。

こちらに関しても、試験内容及び成果の詳細は、開発実施中であることから、ここでの紹介は控えさせていただく。次回、本誌にてアンモニア特集が組まれた際には、是非、両バーナ開発進捗に合わせた成果をご紹介させていただきたい。

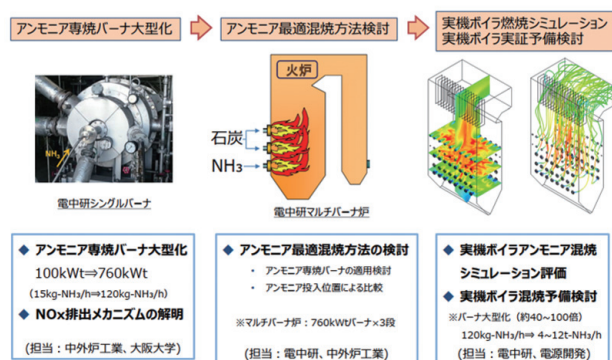


図6 NEDO 事業における開発概要⁷⁾

6. おわりに

本稿では、当社が現在行っているアンモニア専焼技術開発の概要を中心に、省エネ型バーナ及び水素バーナをご紹介した。当社の開発従事者らは、当社におけるアンモニア燃焼技術開発起案当初から携わっており、ここ数年来の脱炭素化への世界的潮流と、そのなかでの燃料としてのアンモニアに対する注目度、期待度の高まりを肌で感じている。

当社では引き続き、工業炉及び火力発電分野におけるアンモニア燃焼技術開発を継続し、早期社会実装を目指す。また、アンモニアのみならず水素や電化、省エネ化技術を各分野へ応用展開することも検討している。当社の燃焼技術が、カーボンニュートラルに向けた課題解決の一助になることを願ってやまない。

— 文 献 —

- 1) (株)野村総合研究所，平成 26 年度エネルギー使用合理化促進基盤整備事業（工業炉等における省エネルギー技術に関する実態調査）報告書，(2015)．
- 2) 塩沢文朗；CO₂ フリー燃料，水素エネルギーキャリアとしてのアンモニアの可能性(その 10)最終回，<https://ieei.or.jp/2020/08/exp1200812/>，(2020) ．
- 3) 経済産業省 資源エネルギー庁 新エネルギーシステム課 / 水素・燃料電池戦略室；今後の水素政策の検討の進め方について，https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/pdf/018_01_00.pdf ， (2020) ．
- 4) 小林秀昭，早川晃弘；日本燃焼学会誌，58，(183)，41 (2016) ．
- 5) トヨタ自動車（株），プレス発表，2018 年 11 月 8 日．<https://global.toyota/jp/newsroom/corporate/25255692.html> (2022.9.9)（当社にて加筆）
- 6) 環境省，2018 年度（平成 30 年度）の温室効果ガス排出量（確報値），2020 年 4 月．
- 7) 野口嘉一（(株)電源開発株式会社）；水素・アンモニア発電技術の現況，公益財団法人 原総合知的通信システム基金主催講演資料，2022 年 3 月 4 日．