

# 石炭アンモニア混焼による 大気質への影響

ラウリ・ミリヴィルタ（主任アナリスト）  
ジェイミー・ケリー（大気質アナリスト）

| 2023年5月



## CREA

Centre for Research on Energy and Clean Air

CREAは、大気汚染の  
動向・原因・健康への影響、  
および解決策の明確化に  
重点的に取り組む独立研究機関です

# 石炭アンモニア混焼による 大気質への影響

## 主要調査結果

- 大気汚染物質の一つである微小粒子状物質（PM<sub>2.5</sub>）は、日本では毎年数千人、世界では数百万人の早期死亡の原因になっています。
- 碧南火力発電所4号機の実証試験における、PM<sub>2.5</sub>と、前駆体ガスの総排出量を試算しました。同施設では、発電に要する燃料の0%、20%、50% はアンモニア（NH<sub>3</sub>）を使用し、残りの燃料源は石炭を使用しています。
- その結果、PM<sub>2.5</sub>と前駆体ガスの総排出量は、発電に要する燃料源の 20% をアンモニア（NH<sub>3</sub>）に置き換えた場合 67% 増加し、50% を置き換えた場合は 167% にまで増加することが分かりました。
- これらの物質の総排出量の大きな増加は、PM<sub>2.5</sub>の前駆体ガスであるアンモニア（NH<sub>3</sub>）の排出に起因しています。NH<sub>3</sub> は輸送と燃焼時に、大気中に放出されています。
- 汚染物質の総排出量の増加は、PM<sub>2.5</sub>濃度の増加につながる可能性が高く、すなわち公衆衛生への負担も増大することになりかねません。

## 目次

主要調査結果	2
目次	3
石炭による大気汚染や気候への影響	4
発電所へのアンモニア燃料供給	5
不確かな、気候への影響	6
明らかにされていない、公害への影響	7
実証試験からの汚染物質排出量の算出方法	8
環境汚染物質排出量の増加	9
地域の公衆衛生への影響	11
生態系の健全性への影響	12
大規模なエネルギー転換計画	12
先行調査との比較	13
結論と提言	14
参考文献	16
別添A - 補足資料	23

## 石炭による大気汚染や気候への影響

石炭燃焼は電力の主要なエネルギー源です。しかし、石炭の燃焼は、人の健康をおびやかす大気汚染物質を生成し、気候変動の原因となる温室効果ガスを排出します。

微小粒子状物質（PM<sub>2.5</sub>）への曝露は、慢性閉塞性肺疾患、虚血性心疾患、肺がん、下気道感染症、糖尿病など、さまざまな呼吸器・循環器疾患を引き起こします（Burnett ほか, 2014; Di ほか, 2017）。また全世界では、PM<sub>2.5</sub> による早期死亡者数が年間400万~800万人にのぼり（Lelieveld ほか, 2015; Burnettほか, 2018）、PM<sub>2.5</sub>による他の非致命的疾患と合わせて、世界経済に8兆米ドルの損失を与えています。これは全世界の GDP の 6.1% に相当します（世界銀行, 2022）。日本国内では、PM<sub>2.5</sub>を原因とした早期死亡者数は、年間4万3千人にもものぼります（State of Global Air, 2022）。

このPM<sub>2.5</sub>の主な発生源は、石炭燃焼によるものです。世界的に見ると、PM<sub>2.5</sub>に関連した年間早期死亡者数のうち、14 %（56万人）の死亡が、石炭燃焼に起因しています（McDuffie ほか, 2021）。日本は世界で4番目の石炭火力発電国であり（Ember, 2021）、石炭火力は日本の電力エネルギー源の28 %を占めています（Our World in Data, 2023）。さらに、日本におけるPM<sub>2.5</sub>濃度の大きな割合（12 %）は、石炭燃焼によるものです（McDuffie ほか, 2021）。また、石炭燃焼は、PM<sub>2.5</sub>だけではなく、温室効果ガスも排出するため、気候変動にも影響を与えています。

アンモニア（NH<sub>3</sub>）は、石炭の代替燃料として、発電所で燃やして発電することができますが、燃焼時に温室効果ガスを排出しません。アンモニアは腐食性の化学物質であり、高濃度のアンモニアに触れると、直ちに、目、皮膚、口腔や呼吸器の粘膜に損傷（激しい刺激や火傷）を与える可能性があります。また、水素（H<sub>2</sub>）のような他のエネルギーキャリアと異なり、アンモニアの輸送は比較的容易かつ安価で、安全です。したがって、アンモニアが、石炭燃焼のグリーンな代替燃料となりえる可能性もゼロではありません（MacFarlane ほか, 2020; Xue ほか, 2019）。

## 発電所へのアンモニア燃料供給

碧南火力発電所は、日本最大の石炭火力発電所で、日本最大の電力合併会社であるJERAが所有しています。ここ数年、この発電所の4号機では、石炭とアンモニアの両方を同時に燃焼させる「混焼」実証試験のための技術改造が行われてきました。別添A-補足資料（SI）の図A1は、新しい燃料源に対応するための施設改造図を示しています。2023年、JERA は 50万トンのアンモニアを石炭と混焼させ、4号機における発電に要するエネルギー源の20%をアンモニア燃料で賄う予定です（JERA, 2022c）。もし成功すれば、この発電所でのアンモニア混焼率を、2050年までに 50% へと引き上げ、2050年以降、国内のすべての超臨界発電所で、アンモニア専燃 100%を達成する計画です（IHI, 2022 c）。

この膨大なアンモニアへの需要を満たすため、JERAは、アンモニア生産・輸送の世界最大手の会社と覚書を締結しました（JERA, 2022 d; JERA, 2022 h; JERA, 2022 b）。碧南火力発電所4号機の燃料源の 20% をアンモニアで賄うためには、アンモニアの国内消費量の2倍の量が必要になります。このため、JERAはアンモニアの供給に向けて、国際競争入札を実施しました（日経, 2023）。その結果、JERAは、米国（CF Industries, 2023）、オーストラリア（Yara, 2023）、ノルウェー（Yara, 2022）などに主要生産拠点を持つ、ヤラ・インターナショナルおよびCFインダストリーズ・ホールディングス（CFI）と、アンモニア供給に関する覚書を締結しました。さらに、遠方から大量のアンモニアを輸入することを想定して、JERAは流通業者とも覚書を締結しました。アンモニアを船用燃料として利用する大型船舶で、アンモニアを輸入する計画です。（JERA, 2022b）。アンモニアの製造場所が確定していないにも拘らず、JERAはすでに遠方からアンモニアを輸入し、アンモニア燃料の輸送船舶を使用することを想定しています。

## 不確かな気候への影響

石炭の代替燃料としてのアンモニア利用は、このエネルギー転換計画が気候変動に与える相対的な影響が未知数であるために、報道機関（ロイター, 2022 a; ロイター, 2022 b; Service, 2018）や科学者たちの団体（Hughes ほか, 2022; MacFarlane ほか, 2020）によって、広く精査されました。石炭とアンモニアが気候に影響を与えうる理由の一つに、これらの燃料が強力な温室効果ガスである、二酸化炭素の排出につながる可能性があるからです。火力発電所で燃料が燃やされると、二酸化炭素が排出されます。対照的に、アンモニアを燃やしても二酸化炭素は排出されません。ところが、アンモニアの化学的な製造ラインで、二酸化炭素が排出される可能性があるのです。

アンモニアには複数の製造方法があり、これは生成時に使われる燃料および排出される二酸化炭素の回収方法で区別されます。アンモニア ( $\text{NH}_3$ ) は、水素 ( $\text{H}_2$ ) と窒素 ( $\text{N}_2$ ) を組み合わせ生成され、水素は水から、窒素は空気から作られます。これらの化学反応には、大量のエネルギーが必要です。「グレー」や「ブラウン」とも呼ばれる従来のアンモニア製造方法は、化石燃料を燃料源にするため、製造ラインで二酸化炭素を排出します。ブルー・アンモニア製造においては、燃料源として化石燃料を使用するものの、排出された二酸化炭素を大気中から除去するために炭素回収・貯留 (CCS) を伴う方法で製造されます。グリーン・アンモニア製造では、再生可能エネルギーがエネルギー源として使われるため、二酸化炭素は排出されません。ブルー・アンモニアとグリーン・アンモニアを組み合わせた製造方法はクリーン・アンモニアと呼ばれます。しかし、このクリーンな製造法は方法論的制約があるため、低い普及にとどまっています。

現在、アンモニアの大半はグレーとブラウンの製造方法で生産されているため、アンモニア製造は温室効果ガス排出の大きな原因となっています。アンモニアの生産は、毎年5億トンの二酸化炭素を排出し、これは世界の二酸化炭素排出量の2%に相当します（The Royal Society, 2020）。

石炭火力発電所でのアンモニア混焼が気候に与える影響は、アンモニアの製造方法に大きく依存することが、科学的な研究により明らかになっています。日本の全ての石炭火力発電所で使用する燃料の20%を、クリーンなアンモニアに置き換えた場合、日本の二酸化炭素の排出量は年間4000万トン減少すると推定されています（Stocksほか, 2022）。しかし、アンモニアが国外でグレー、またはブラウン方法で製造されていた場合、日本国内の発電所で二酸化炭素排出量が削減されても、国外でのアンモニア製造時に排出される二酸化炭素排出量が増加するため、総排出量は完全に相殺され、世界的な二酸化炭素の総排出量の削減にはなりません（Stocksほか, 2022）。したがって、世界の化学製造分野に大きな変化がない限り、日本のエネルギー分野で石炭をアンモニアに置き換えても、気候に関するメリットは得られないと考えられます。

## 明らかにされていない、公害への影響

さらに、石炭専燃からアンモニア混焼に移行した場合、PM<sub>2.5</sub>の排出量にも影響をおよぼす可能性を無視することはできません（Luほか, 2017）。石炭とアンモニアの生産、輸送および燃焼は、様々な物質の排出を通じて、PM<sub>2.5</sub>に影響します。PM<sub>2.5</sub>は、大気中に直接排出されるものと、大気中で前駆物質である窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）、二酸化硫黄（SO<sub>2</sub>）、アンモニア（NH<sub>3</sub>）によって生成されるものがあります（模式図は図A2参照）。

石炭からの排出物質と、それがどのようにPM<sub>2.5</sub>の生成に関与しているかは、比較的広く周知されています。石炭がPM<sub>2.5</sub>生成に関与するのは、主に石炭の採掘時と燃焼時です。採掘工程では、PM<sub>2.5</sub>を排出し、燃焼時には、PM<sub>2.5</sub>の他に、二酸化窒素、二酸化硫黄も排出します。碧南火力発電所4号機をはじめとする石炭火力発電所では、毎年これらの排出量を測定しています。アンモニア製造における排出量をみると、全体の0.001%が意図せず大気中に放出されていることがわかっています（欧州環境庁、2021）。しかし、我々の知る限り、輸送中に排出されるアンモニアは、数値化されていません。科学的調査によると、米国とベルギー間の液体メタンの往復輸送時においては、不安定な圧力を避けるための大気中排出と、また、船を推進するための燃料使用のため、0.1%のメタンが輸送中に大気放出されていることがわかっています（



Balcome ほか, 2022)。アンモニアは燃焼時に、未反応のアンモニア（別称「アンモニアスリップ」）と二酸化窒素を排出します。日本政府は、石炭とアンモニアの混焼は、石炭専燃と比較して、二酸化窒素の排出量には影響がないと報告しています（資源エネルギー庁, 2021）が、未反応のまま大気中に排出されるアンモニアの量は、非常に不確実であり、複数の異なる要因に依存するため、0.1～25%であると推定されています（Balcomeほか, 2022; DieselNet, 2023）。

総合的にみて、石炭をアンモニアに置き換えた場合、複数の異なる工程（生産、輸送、燃焼）を通じて、複数の異なる種類の物質（PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>）の排出量に影響をおよぼします。そして総排出量の変化が十分に大きければ、PM<sub>2.5</sub>の大気中濃度や人体にも、影響およぼす結果になります。

## 実証試験からの汚染物質排出量の算出方法

本調査では、碧南火力発電所4号機における、石炭とアンモニア混焼が大気質へおよぼす影響を調べました。調査方法として、エネルギー需要は一定に保ちながら、石炭とNH<sub>3</sub>の異なる燃料混合比（100:0、80:20、50:50）の下、PM<sub>2.5</sub> とその前駆物質の排出量を数値化しました。燃料のライフサイクル（採掘、工業生産、輸送、燃焼）からの排出も考慮しています。

それぞれの工程、混合比、物質に応じて、さまざまな方法を用いて排出量を算出したものを、表1に示しています。JERAは現在、石炭専燃（100:0）で稼働しており、石炭の燃焼によって生じるPM<sub>2.5</sub>、窒素酸化物、硫黄酸化物の排出量を数値化しているため（Koplitz ほか, 2017）、これらの値を直接使用しました（表1）。それ以外の工程の燃料混合比については、PM<sub>2.5</sub>と二酸化硫黄の排出量は、石炭の減少に比例して減少するとし、窒素酸化物の排出量には変化がないと仮定します。残りの工程や混焼率、物質については、基礎となるそれぞれの工程のデータ（石炭生産、アンモニア生産、アンモニア輸送、アンモニア燃焼）と、文献から得た排出係数の測定値を組み合わせています。また、アンモニア燃焼に使用する排出係数は、推定範囲（0.1～30%）の下限である0.1%で計算しているため、保守的な推定値となります。



表1 - 石炭とNH<sub>3</sub>試験による排出量の算出に使用した方法とデータ

工程	物質	100:0	80:20	50:50
石炭採掘 <sup>a</sup>	PM <sub>2.5</sub>	石炭生産 × 排出係数		
NH <sub>3</sub> 生産 <sup>a</sup>	NH <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub> 生産 × 排出係数		
NH <sub>3</sub> 輸送 <sup>b</sup>	NH <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub> 輸送 × 排出係数		
燃焼 <sup>d</sup>	PM <sub>2.5</sub>	報告値	報告値 × 0.8	報告値 × 0.5
燃焼 <sup>d</sup>	SO <sub>2</sub>	報告値	報告値 × 0.8	報告値 × 0.5
燃焼 <sup>d</sup>	NO <sub>2</sub>	報告値	報告値	報告値
燃焼 <sup>c</sup>	NH <sub>3</sub>	NH <sub>3</sub> 燃焼 × 排出係数		

出典：石炭採掘a、NH<sub>3</sub>生産aの排出係数は欧州環境庁（2021）から、NH<sub>3</sub>生産bはBalcomeほか（2022）から、NH<sub>3</sub>の燃焼cはBalcomeほか（2022）およびDieselNet（2023）より引用。石炭の燃焼dの報告排出量はKoplitz ほか（2017）から引用。



## 環境汚染物質排出量の増加

図1は、碧南火力発電所4号機における、様々な混焼比率における物質排出量を示しています。石炭のみを専焼した場合（100:0）、すべての物質（PM<sub>2.5</sub> + SO<sub>2</sub> + NO<sub>2</sub> + NH<sub>3</sub>）と工程（生産 + 輸送 + 燃焼）における物質の総排出量は、1,348トンになります。このケースで最も多く排

出されるのは、NO<sub>2</sub>（800トン）とSO<sub>2</sub>（529トン）です。一方、PM<sub>2.5</sub>の排出量はごくわずか（19トン）で、NH<sub>3</sub>は排出されません。

ところが石炭とアンモニアを混焼すると、汚染物質総排出量は大幅に増加します。アンモニアの混焼率が0%（100:0）から20%（80:20）に増加した場合、汚染物質総排出量は67%（1,348トンから2,249トン）も増加します。さらに懸念されるべきこととして、アンモニアの混焼率が0%（100:0）から50%（50:50）になった場合、総排出量はじつに167%（1,348トンから3,602トン）も増加してしまいます。このように、汚染物質総排出量が増大する理由は、アンモニアの排出量にあります。アンモニア排出量は、アンモニアの混焼率が20%（80:20）の場合は1,011トンの増加、50%（50:50）の場合は2,528トンも増加します。その一方で、PM<sub>2.5</sub>（4～9トン）とSO<sub>2</sub>（106～265トン）の排出量はわずかに減少するだけで、NO<sub>2</sub>の排出量は変化しません。したがって、アンモニア混焼した場合、アンモニア（NH<sub>3</sub>）の排出量が大幅に増加し、他の物質（PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub>）の排出量のごくわずかな減少をも完全に相殺してしまうことになることがわかりました。

地理的にみると、増加した汚染物質は碧南火力発電所と、国外に分布されます。アンモニア混焼におけるNH<sub>3</sub>排出量の増加は、半分がアンモニアの輸送時、半分が燃焼時に排出されます。このため、石炭をアンモニア（NH<sub>3</sub>）に置き換えた場合、碧南発電所と、燃料を輸送する船の航路の両方に、総排出量の増加が分散します。石炭専焼の場合（100:0）、碧南火力発電所の汚染物質総排出量は1,348トン（図1、黒星参照）です。ところが、アンモニア混焼率を20%（石炭80：NH<sub>3</sub>20）と50%（石炭50：NH<sub>3</sub>50）にすると、碧南火力発電所の汚染物質総排出量はそれぞれ1,738トン（+30%）と2,339トン（+75%）に増加します（図1、黒い星参照）。

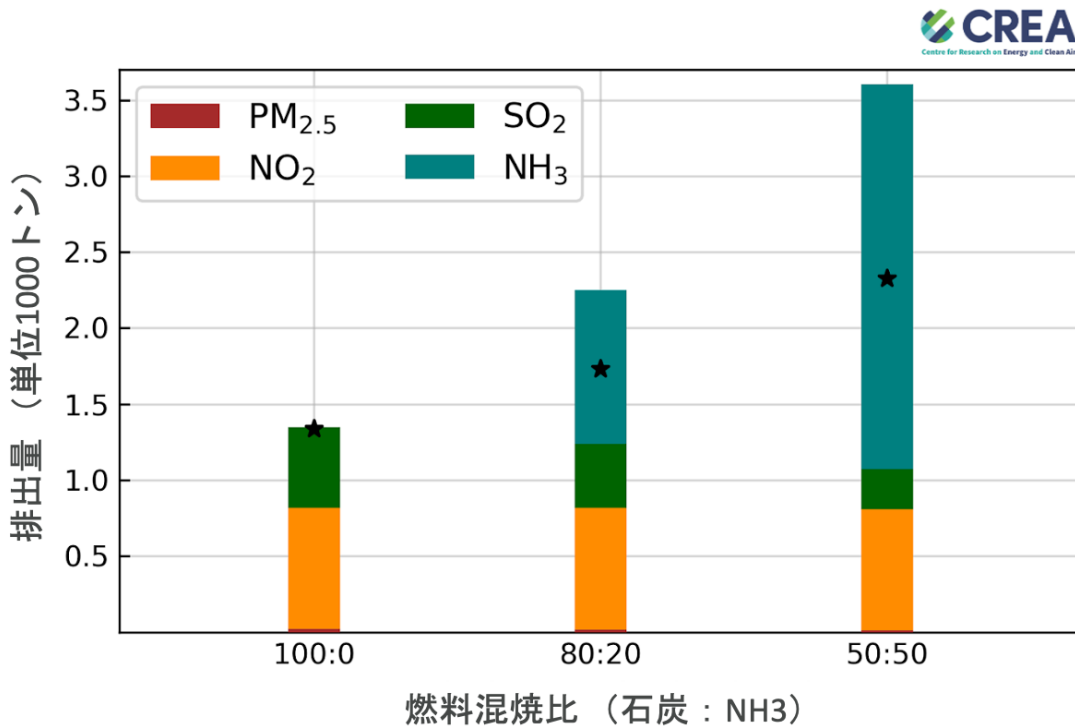


図1 碧南火力発電所4号機におけるPM<sub>2.5</sub>とその前駆種 (NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>) の排出量

注：3つの異なる燃料混焼比における、すべての工程（生産+輸送+燃焼）から排出されるPM<sub>2.5</sub>（赤）、SO<sub>2</sub>（緑）、NO<sub>2</sub>（オレンジ）、NH<sub>3</sub>（青）排出量を示しています。燃焼のみによる汚染物質総排出量（PM<sub>2.5</sub> + SO<sub>2</sub> + NO<sub>2</sub> + NH<sub>3</sub>）は黒星で示されています。

出典：図の作成に使用したデータは、Koplitzほか（2017）、欧州環境庁（2021）、Balcomeほか（2022）、DieselNet（2023）より引用

## 地域の公衆衛生への影響

碧南火力発電所4号機における様々な物質の排出量の増加は、人間の健康に甚大な影響を与えると考えられます。その理由として、(i) 総排出量の増加が相当になる上に、重要な物質の排出を含むこと、(ii)  $PM_{2.5}$ が、大気中を長距離移動すること、(iii)  $PM_{2.5}$  はたとえ僅かな濃度の増加でも、人間の死亡リスク要因の大きな増加につながる危険性が挙げられます。また、碧南火力発電所4号機での排出量増加は大規模（30～75%）かつ、 $PM_{2.5}$ の強い前駆物質であるアンモニアの排出量増加も含んでいるため、 $PM_{2.5}$ の大気中濃度が増加することが予測されます（Guほか、2021）。濃度が上昇した $PM_{2.5}$ は、数週間にわたって大気中に滞留し、広い範囲に影響がでると考えられます。例えば、日本の $PM_{2.5}$ 濃度は、中国など数千キロメートル離れた場所で発生した排出物の影響を受ける（藍川ほか、2010）ことから、碧南火力発電所からの排出物が、50kmしか離れていない近隣都市の名古屋市（人口200万人程度）の $PM_{2.5}$ 濃度に影響を与える可能性は、極めて高いといえます。 $PM_{2.5}$ 濃度は、わずかな変化でも死亡リスクの増大につながるため、大気中濃度の増加により、公衆衛生に大きな影響をおよぼす可能性があります（Vonodosほか、2018）。

## 生態系の健全性への影響

これらの物質の排出量増加は、窒素沈着量の増加を通じて、環境にも悪影響を与える可能性があります。有機体の健康の一部は、窒素、鉄、リンといった、栄養素の絶妙なバランスによって保たれています。栄養素のバランスに変化が生じれば、植物や藻類が過剰繁殖する富栄養化を引き起こします。人間の活動は、窒素沈着量を大幅に増加させ、栄養素のバランスを崩し、沿岸生態系の富栄養化（Malone ほか、2020）、海洋生態系バランスの悪化（Kim ほか、2014 a; Kim ほか、2014 b; Ren ほか、2017）、日本における生物多様性の損失（Lin ほか、2021）を招いてきました。したがって、 $NH_3$ が、船舶輸送と燃焼によって大気中に放出されると、最終的に海洋や陸上の生態系に蓄積してしまい、環境問題をさらに悪化させることになってしまいます。

## 大規模なエネルギー転換計画

現在日本では、碧南火力発電所4号機で50万トンのアンモニア混焼の実証研究を行った後、他の発電所でも、石炭からアンモニアへの燃料置き換えを拡大していく複数の計画が進んでいます。日本政府は、混焼技術を日本全国の石炭火力発電所に展開することで、2023年までに、アンモニアの年間需要が300万トン、2050年には3000万トンに達すると見込んでいます（METI, 2022）。JERAは、日本全国の発電所（JERA, 2022 g）をはじめ、マレーシア（JERA, 2022 a）とシンガポール（JERA, 2022 f）の発電所でも混焼事業を検討しているほか、NH<sub>3</sub>の製造（JERA, 2022 d; JERA, 2022 h）と輸送（JERA, 2022 b）を国際的に展開する覚書を締結しています。また、三菱重工業（MHI）やIHIといった日本企業も、インドネシア（MHI, 2022; IHI, 2022 b）、シンガポール（MHI, 2022 a）、台湾（MHI, 2022 d）、タイ（MHI, 2023）、インド（IHI, 2022 a）、チリ（MHI, 2022 c）で、石炭と NH<sub>3</sub>の混焼事業を検討する覚書を締結しています。このことは、インドネシアにとってとりわけ重要です。というのも、インドネシアでは、PM<sub>2.5</sub> によって、毎年94,000人もの早期死亡が発生し、死因の約 13%が石炭に起因しているからです（McDuffie ほか、2021）。さらに、これらのプロジェクトの中には、アンモニア混焼率を30%（MHI, 2022 c）や100%（JERA, 2022 f）といった高い比率で使用するものもあります。このため、実証試験終了後に、大気汚染が日本国内にとどまらず、複数の周辺諸外国にも波及する可能性が非常に高いといえます。

## 先行調査との比較

我々の調査では、碧南火力発電所4号機でのアンモニア混焼は、PM<sub>2.5</sub> を増加させる可能性があることが判明し、独立した研究（Lu ほか、2017）によっても、この結論を裏付けることもできました。熱容量1000MWの4号機で、長期（1年）のアンモニア混焼（20～50%）による排出量を推定するために、査読済みの科学研究データを使用し、燃料のライフサイクル（採掘、生産、輸送、燃焼）のすべての側面を考慮し、結論に達しました。

一方、日本の電力会社が実施した先行研究では、（原, 2019; 藤原, 2019）、特定の条件下において、アンモニア混焼によるPM<sub>2.5</sub>への影響を最小化できることが暗示されています。しかし、我々の調査方法とは対照的に、この研究には、独立した査読を受けていない独自の実験データが使用されています。例えば、いくつかの実験では、低い熱入力（10 MW）下、かつ短期間で、低いアンモニア混焼率（6~20 %）のケースを調査しているのにとどまっています。さらに、アンモニア混焼の大気排出量増加の主な要因の1つである、アンモニアの国際輸送時の排出は考慮していません。したがって、この研究結果が、実際の運用条件にかなったものであるかどうかは、非常に不確かであるといえます。実際、電力会社による研究の報告者は、次のように結論付けています。

「...ただし、実機規模での燃焼特性評価や、運用上想定される様々な炭種、燃焼条件に対しての評価は不十分であり、実用化に先立って今後のさらなる技術的検討が望まれる。また、固体燃料である石炭とガス燃料であるアンモニアの混合時の燃焼現象については未解明な部分が多く、数値解析における燃焼モデリングの高度化および現象論的な観点からの燃焼最適化のために、基礎現象の解明にも引き続き取り組んでいく必要がある」<sup>1</sup>

## 結論と提言

数十年にわたる科学研究、環境政策、大気汚染緩和技術の投資により、日本の大気質は大幅に改善されてきました（若松ほか, 2013）。例えば、日本のPM<sub>2.5</sub>平均濃度は、2010年から2018年の間に、30%も減少しています（伊藤ほか, 2021）。しかし、日本のPM<sub>2.5</sub>濃度は依然として、世界保健機関（WHO）が策定したガイドライン値を超えており、この汚染物質は、早期死亡と様々な障害を引き起こす主要リスクの、8番目の要因となっています（State of Global Air, 2022）。

<sup>1</sup> 原三郎, 一般財団法人 電力中央研究所, 2019, p.68-69.

本報告書では、混焼により石炭をアンモニアに置き換えることで、日本の大気質の改善が損なわれる、あるいは無効化してしまう可能性があることを示しています。

調査の結果、石炭をアンモニア (NH<sub>3</sub>) に置き換えると、PM<sub>2.5</sub> の主要な前駆物質であるアンモニア (NH<sub>3</sub>) の排出量が大幅に増加し、PM<sub>2.5</sub> の濃度が上昇する可能性があることが判明しました。混焼技術導入の拡大によって、人間の健康が危険にさらされる前に、以下を提言します。

- 碧南火力発電所4号機のアンモニア混焼に伴う排出量の変化は、PM<sub>2.5</sub>濃度にどのような影響を与えるかについてを調査をすること。我々の調査結果によると、アンモニア (NH<sub>3</sub>) の輸送と燃焼の両方を通じて、アンモニア (NH<sub>3</sub>) の排出量が大幅に増加することが明らかになった。そのため、PM<sub>2.5</sub>の濃度が高まり、健康への悪影響をおよぼす危険性が高くなるといえる。
- 国内外の発電所で混焼を拡大した場合の、排出量や大気質の変化について、高いアンモニア混焼率を用いて調査すること。

石炭火力発電所におけるアンモニア混焼によって、日本のエネルギー需要を満たすためには、膨大な量のアンモニアが必要になります。我々の調査の結論として、高騰するアンモニア需要を満たすためには、大規模なアンモニアの大気放出が避けられず、結果として人間の健康、健全な生態系、そして経済に壊滅的な影響を及ぼす可能性があります。



## 参考文献

資源エネルギー庁 (2021). アンモニアが“燃料”になる?! (後編) ~カーボンフリーのアンモニア火力発電[https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ammonia\\_02.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ammonia_02.html)

藍川ほか (2010). Significant geographic gradients in particulate sulfate over Japan determined from multiple-site measurements and a chemical transport model: Impacts of transboundary pollution from the Asian continent. [多サイト測定と化学輸送モデルによって決定された日本上空の粒子状硫酸塩の顕著な地理的勾配:アジア大陸からの越境汚染の影響]  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231009008863?via%3Dihub>

Burnett ほか (2014). An integrated risk function for estimating the Global Burden of Disease attributable to ambient fine particulate matter exposure. [微小粒子物質への曝露に起因する世界疾病負担を推定するための統合リスク関数] <https://doi.org/10.1289/ehp.1307049>

Burnett ほか (2018). [大気中微小粒子状物質への長期曝露に伴う死亡率の世界的推定値]  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115>

CF Industries (2023). Ammonia Production. [アンモニア製造]  
<https://www.cfindustries.com/what-we-do/ammonia-production>

DieselNet (2023). Selective Catalytic Reduction. [選択触媒還元]  
[https://dieselnet.com/tech/cat\\_scr.php](https://dieselnet.com/tech/cat_scr.php)

Di ほか (2017). 大気汚染とメディケア集団の死亡率, (ニューイングランド・ジャーナル・オブ・メディシン) <https://www.nejm.jp/abstract/vol376.p2513>

Ember (2021). Top 25 Coal Power Countries in 2020. [2020年世界の石炭火力国トップ25]

<https://ember-climate.org/insights/research/top-25-coal-power-countries-in-2020/>

欧州環境機関 (2021). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. [EMEP/EEA 大気汚染物質排出インベントリガイドブック2019] <http://efdb.apps.eea.europa.eu>

藤森 (2019). 石炭火力発電における微粉炭・アンモニア混合燃焼技術の開発, (株式会社 IHI)

<https://www.jst.go.jp/sip/dl/k04/end/team6-14.pdf>

Gu ほか (2021). Abating ammonia is more cost-effective than nitrogen oxides for mitigating PM<sub>2.5</sub> air pollution. [PM2.5 大気汚染対策における、窒素酸化物を超えるアンモニア削減の優れた費用対効果] DOI: [10.1126/science.abf8623](https://doi.org/10.1126/science.abf8623)

原 (2019). 既設火力発電所におけるアンモニア利用に関する検討 (一般財団法人電力中央研究所) <https://www.jst.go.jp/sip/dl/k04/end/team6-8.pdf>

Hughes ほか (2022). Japan wants to burn ammonia for clean energy – but it may be a pyrrhic victory for the climate. [日本のクリーンエネルギーのためのアンモニア燃焼は、気候にとってはピュロスの勝利になりかねない]

<https://theconversation.com/japan-wants-to-burn-ammonia-for-clean-energy-but-it-may-be-a-pyrrhic-victory-for-the-climate-174782>

IHI (2022 a). NEDO公募採択を受け、インド火力発電所におけるアンモニア混焼の検討を本格開始 [https://www.ihico.jp/ihico/all\\_news/2022/resources\\_energy\\_environment/1198018\\_3473.html](https://www.ihico.jp/ihico/all_news/2022/resources_energy_environment/1198018_3473.html)

IHI (2022 b). ASEAN初となる事業用発電設備での燃料アンモニアの小規模混焼を実施～東南アジアでの社会実装の早期化につなぐ～

[https://www.ihico.jp/ihico/all\\_news/2022/resources\\_energy\\_environment/1198041\\_3473.html](https://www.ihico.jp/ihico/all_news/2022/resources_energy_environment/1198041_3473.html)

IHI (2022 c). 碧南火力発電所におけるアンモニア混焼率向上技術の実証の採択について

[https://www.ihico.jp/ihico/all\\_news/2021/resources\\_energy\\_environment/1197627\\_3345.html](https://www.ihico.jp/ihico/all_news/2021/resources_energy_environment/1197627_3345.html)

伊藤ほか, (2021). 過去30年間の日本の大気質トレンド <https://doi.org/10.3390/atmos12081072>

JERA (2022 a). マレーシアにおけるアンモニア利用拡大に向けたIHI Asia Pacific社との共同検討について [https://www.jera.co.jp/news/information/20221026\\_995](https://www.jera.co.jp/news/information/20221026_995)

JERA (2022 b). 燃料アンモニアの輸送に向けた日本郵船および商船三井との協業について [https://www.jera.co.jp/news/information/20221121\\_1009](https://www.jera.co.jp/news/information/20221121_1009)

JERA (2022 c). 碧南火力発電所のアンモニア混焼実証事業における大規模混焼開始時期の前倒しについて [https://www.jera.co.jp/news/information/20220531\\_917](https://www.jera.co.jp/news/information/20220531_917)

JERA (2022 d). ブルーアンモニア製造事業の共同開発および燃料アンモニア調達に向けた Yara International ASAとの協業検討について [https://www.jera.co.jp/news/information/20230117\\_1069](https://www.jera.co.jp/news/information/20230117_1069)

JERA (2022 f). ジュロン・ポート社およびMHI-APとのシンガポールにおけるアンモニア専焼ガスタービン発電事業の共同検討に関する覚書の締結について [https://www.jera.co.jp/news/information/20220819\\_961](https://www.jera.co.jp/news/information/20220819_961)

JERA (2022 g). JERA、九州電力、中国電力、四国電力、東北電力による水素・アンモニア導入に向けた協業検討について [https://www.jera.co.jp/news/information/20221129\\_1018](https://www.jera.co.jp/news/information/20221129_1018)

JERA (2022 h). ブルーアンモニア製造事業の共同開発および燃料アンモニア調達に向けた CF Industriesとの協業検討について [https://www.jera.co.jp/news/information/20230117\\_1068](https://www.jera.co.jp/news/information/20230117_1068)

Kim ほか (2014 a). Impact of atmospheric nitrogen deposition on phytoplankton productivity in the South China Sea.[南シナ海における植物プランクトン生産への大気窒素降下の影響]

<https://doi.org/10.1002/2014GL059665>

Kim ほか (2014 b). Increasing anthropogenic nitrogen in the North Pacific Ocean.[北太平洋における人為的窒素の増加] [DOI: 10.1126/science.1258396](https://doi.org/10.1126/science.1258396)

Koplitz ほか (2017). Burden of Disease from Rising Coal-Fired Power Plant Emissions in Southeast Asia. [東南アジアにおける石炭燃焼発電所排出物から起こる疾病の負荷] [10.1021/acs.est.6b03731](https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03731)

Lelieveld (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. [若年死亡率に対する屋外の大気汚染源の全球規模の寄与] [doi:10.1038/nature15371](https://doi.org/10.1038/nature15371)

Lin ほか (2021). Increased nitrogen deposition contributes to plant biodiversity loss in Japan: Insights from long-term historical monitoring data.[窒素沈着の増加は日本の植物生物多様性損失に寄与する:長期歴史的モニタリングデータからの洞察] [10.1016/j.envpol.2021.118033](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118033)

Lu ほか (2017). PM<sub>2.5</sub>-related health impacts of utilizing ammonia-hydrogen energy in Kanto Region, Japan. [関東地域ににおけるアンモニア水素エネルギー利用によるPM2.5関連健康影響] [10.1007/s11783-018-1005-3](https://doi.org/10.1007/s11783-018-1005-3)

Malone ほか (2020). The Globalization of Cultural Eutrophication in the Coastal Ocean: Causes and Consequences.[沿岸海洋における文化富栄養化のグローバル化:原因と結果]

<https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00670>

経済産業省 (2022). 火力発電の「ゼロエミッション化」に資する日本の技術をまとめたデジタルパンフレット (英語版)

[https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/for\\_energy\\_technology/pdf/pamphlet\\_0201.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/for_energy_technology/pdf/pamphlet_0201.pdf)

McDuffie ほか (2021). Source Sector and Fuel Contributions to Ambient PM<sub>2.5</sub> and Attributable Mortality Across Multiple Spatial Scales. [複数の空間スケールにおけるPM2.5および帰属死亡率に対する発生源セクターと燃料の寄与] Nature Communications, 12 (3594).

[doi.org/10.1038/s41467-021-23853-y](https://doi.org/10.1038/s41467-021-23853-y)

MacFarlane ほか (2020). A Roadmap to the Ammonia Economy. Cell Press. [アンモニア経済へのロードマップ, Cell Press]

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2542435120301732?token=896947B777EF157D817FB2129BF2D798ACBDACBB80D399D0DDD60BAC8705F864287F920DF23D4E515056EAA4FB5AD827&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230213145056>

三菱重工 (2022 a). シンガポール・ジュロン島におけるアンモニア専焼GTCC発電所の開発に向けケッペル社、三菱重工、DNVの3社が定量的リスクアセスメント実施に関する覚書に調印

<https://www.mhi.com/jp/news/220927.html>

三菱重工 (2022 b). インドネシア各地の発電所で水素・バイオマス・アンモニアとの混焼を共同調査 三菱重工がインドネシアパワーと事業化調査3件でMOUに調印

<https://www.mhi.com/jp/news/221102.html>

三菱重工 (2022 c). チリ・グアコルダ社の石炭火力発電所に対するアンモニア混焼導入へ覚書に調印 30%混焼実証に向けた詳細検討を2026年までの2フェーズで実施

<https://www.mhi.com/jp/news/221207.html>

三菱重工 (2022 d). 台湾電力・林口石炭火力発電所でのアンモニア混焼へ覚書に調印 三菱重工が三菱商事および三菱商事マシナリとの関係4社で <https://www.mhi.com/jp/news/22111702.html>

日経 (2023). JERA、アメリカから燃料アンモニア輸入へ 2社と協議

<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC176OH0X10C23A1000000/>

Our World in Data (2023). Japan: Energy Country Profile. [日本：エネルギーに関する国別プロフィール] <https://ourworldindata.org/energy/country/japan>

Ren ほか (2016). 21st-century rise in anthropogenic nitrogen deposition on a remote coral reef. [遠隔珊瑚礁上の人為的窒素堆積の21世紀上昇] DOI: [10.1126/science.aal3869](https://doi.org/10.1126/science.aal3869)

ロイター (2022 a). Japan's JERA, IHI to work on ammonia use at Malaysian coal power plants. [日本のJERAとIHI、マレーシア火力発電所でアンモニア混焼を検討]

<https://www.reuters.com/business/energy/japans-jera-ihl-work-ammonia-use-malaysian-coal-power-plants-2022-10-26/>

ロイター (2022 b). Hooked on coal for power, Japan aims for ammonia fix. [脱石炭できない日本、アンモニア混焼を目指す]

<https://www.reuters.com/business/energy/hooked-coal-power-japan-aims-ammonia-fix-2021-10-29/>

王立学会 (2020). Ammonia: Zero-carbon fertilizer, fuel and energy store. [アンモニア：ゼロカーボン肥料・燃料・エネルギー貯蔵]

<https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/green-ammonia/green-ammonia-policy-briefing.pdf>

Service (2018). Ammonia—a renewable fuel made from sun, air, and water—could power the globe without carbon. [アンモニア - 太陽・空気・水から作られる再生可能な燃料 - による炭素を生まさない電力の世界の可能性]

<https://www.science.org/content/article/ammonia-renewable-fuel-made-sun-air-and-water-could-power-globe-without-carbon>

State of Global Air (2022). Japan Air Pollution and Health Fact Sheet. [日本の大気汚染と健康被害の統計資料] <https://cdn.zevross.com/hei/country-reports/v1/pdf/Japan.pdf>

Stocks ほか (2022). Global emissions implications from co-combusting ammonia in coal fired power stations: An analysis of the Japan-Australia supply chain. [石炭火力発電所における共燃焼アンモニアからの地球規模排出の意義: 日本-オーストラリアサプライチェーンの解析]

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130092>

Vonodos ほか (2018). The concentration-response between long-term PM<sub>2.5</sub> exposure and mortality; A meta-regression approach. [長期PM2.5曝露と死亡率の間の濃度応答; メタ回帰アプローチ] [10.1016/j.envres.2018.06.021](https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.06.021)

若松ほか (2013). Air Pollution Trends in Japan between 1970 and 2012 and Impact of Urban Air Pollution Countermeasures. [1970年から2012年までの日本の大気汚染の推移と都市における大気汚染対策の影響について] <http://koreascience.or.kr/article/JAKO201306366997857.page>

世界銀行 (2022). The Global Health Cost of PM<sub>2.5</sub> Air Pollution: A Case for Action Beyond 2021. [PM2.5 PM<sub>2.5</sub>大気汚染による世界的な健康被害: 2021年以降の活動事例] <https://elibrary.worldbank.org/doi/pdf/10.1596/978-1-4648-1816-5>

Xue ほか (2019). Assessment of Ammonia as an Energy Carrier from the Perspective of Carbon and Nitrogen Footprints. [炭素および窒素フットプリントの展望からのエネルギーキャリアとしてのAmmoniaの評価 【JST・京大機械翻訳】] [10.1021/acssuschemeng.9b02169](https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b02169).





---

Yara (2022). Yara takes sole ownership of decarbonization project at Herøya. [Yara、ヘロイヤで脱炭素化プロジェクトを単独で実施へ]

<https://www.yara.com/news-and-media/news/archive/news-2022/yara-fortsetter-arbeidet-med-a-kutte-norges-storste-punktutslipp/#hegra-english>

Yara (2023). Yara Pilbara Fertilisers. [ヤラ・ピルバラ・ファーターライザー社]

<https://www.yara.com.au/about-yara/about-yara-australia/pilbara/yara-pilbara-fertilisers/>

## 別添A - 補足資料



図A1 - 碧南火力発電所でのアンモニア実証事業について (JERA, 2023 c)

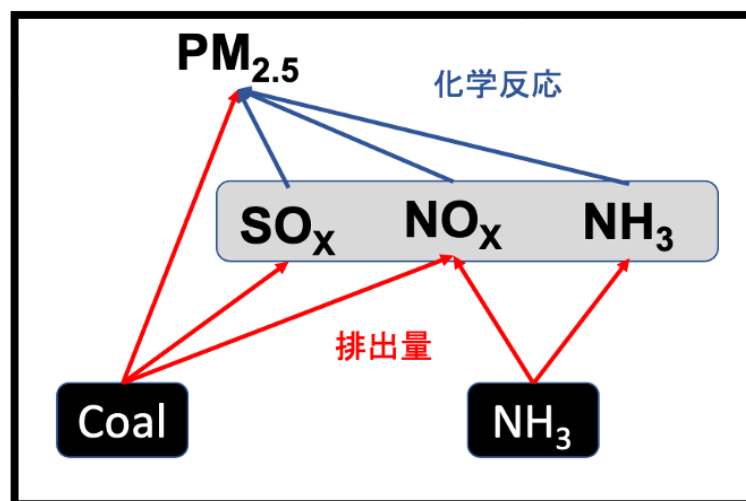


図 A2 - 石炭とアンモニアによる PM<sub>2.5</sub>生成プロセスの模式図