公開用

# 終了報告書

## SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)

## 課題名「エネルギーキャリア」

## 研究開発テーマ名「アンモニア直接燃焼」

研究題目「舶用ディーゼルエンジンへのアンモニア燃料利用に関する実験的

<u>検討」</u>

研究開発期間:平成29年4月1日~平成31年3月31日 研究担当者: 春海 一佳 所属研究機関:国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 目次

1	•	本研	F究	の目	主的	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	1	
2	•	研究	開	発目	目標	と	7	1	ル	ス	$\mathbb{P}$		-ン	/ •	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	3	
3		研究	開	発手	ミ施	内	容	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	3	
	3 -	-1.	実	験装	證	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	3
	3 -	-2.	Г	ンモ	<u>=</u>	ア治	昆虏	臣 <del>了</del>	┝備	試	験	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	6
	3 -	-3.	ア	ンモ	==	ア治	昆虏	12機	鍥	0	運	転	状	態	が	大	気	汚	染	物	質	排	出	量	に	及	ぼ	す	影	轚	•	•	•	•	•	•	•	•	7
	3 -	-4.	轁	油噴	鮒	)>	ズル	10,	)変	更	が	P	ン	モ	二	P	混	焼	時	の	大	気	汚	染	物	質	の	排	<u></u> Ц(	2)	及	ぼ	す	影	響	•	•	•	10
	3 -	- 5.	水	素及	とび	メク	タン	1 T)	)混	合	が	P	ン	モ	二	P	混	焼	時	の	大	気	汚	染	物	質	の	排	±1	2,	及	ぼ	す	影	響	•	•	•	11
	3 -	-6.	ア	パー	ュッ	下噴	賁身	すに	こよ	る	P	ン	モ	=	P	燃	焼	効	率	改	善	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	12
	3 -	- 7.	酸	化魚	媒	のヤ	生能	3	〕測	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	13
	3 -	- 8.	排	気後	後処.	理對	表置	影に	こよ	る	未	燃	P	ン	モ	Ξ	P	2	窒	素	酸	化	物	の	低	减	効:	果	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	18
	3 -	-9.	ア	ンモ	-=	ア煌	然彩	船	おこ	係	わ	る	既	存	規	則	の	調	査	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	19
	3 -	-10	Э.	まと	め	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	20
	3 -	- 1	1.	今後	後の	課是	<u>頁</u> ・	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	22
4		外剖	3発	表手	ミ績						•	•	•	•	•	•	•			•	•	•	•	•	•	•				•	•	•	•			•	• ;	22	
	4 -	-1.	論	ì文系	表	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	22
	4 -	-2.	学	会、	展	示会	会等	<b>译</b> 発	表	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	22
	4 -	-3.	. 7	°レフ	く発	表	•••	•	•	•	•	•	•	•			•	•		•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	22
	4 -	-4.	$\overline{\gamma}$	・スァ	デ	イラ	ア葉	爭耵	材	に	よ	る	公	表	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	23
5	•	特許	出	願爭	ミ績		• •	•	• •		•	•	•	•	•	•	•	•	4	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•		•	•	23	
6		参考	文	献	•	• •		•			•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•		•	• :	23	

図表一覧

- 図1 研究概要図
- 図2 実験装置概要図
- 図3 実験装置全体図
- 図4(a) アンモニア供給設備(液化アンモニアタンク及び温水ジャケット)
- 図4(b) アンモニア供給設備(流量計及びバッファタンク)
- 図5 筒内圧力計及び吸気圧力計
- 図6 排気圧力計

- 図7 クランクアングルセンサ
- 図8 シリンダヘッドに設置された電子制御燃料噴射弁
- 図9 電子燃料噴射コントローラ
- 図10 供給熱量割合と未燃率
- 図 11 筒内圧力解析結果(100%負荷率)
- 図12 熱効率及び排気成分の変化(100%負荷率)
- 図13 熱効率及び排気成分の変化
- 図 14 筒内圧力及び燃料噴射圧力(1000 rpm)
- 図 15 筒内圧力及び燃料噴射圧力(1500 rpm)
- 図16 筒内圧力解析結果(ノズルの影響)
- 図 17 熱効率及び排気成分の変化(ノズルの影響)
- 図18 水素及びメタンガス混合の効果
- 図 19 水素及びメタンガス混合の効果(比較表示)
- 図 20 パイロット噴射タイミングが熱効率及び排気成分に与える影響
- 図 21 筒内圧力及び燃料噴射信号(1000 rpm)
- 図 22 筒内圧力及び燃料噴射信号(1500 rpm)
- 図 23 ガス流通式触媒試験装置概要
- 図 24 酸化触媒のアンモニア酸化性能
- 図 25 触媒出口ガス NO 濃度
- 図 26 触媒出ロガス N<sub>2</sub>O 濃度
- 図 27 水分がアンモニア酸化性能に及ぼす影響
- 図 28 触媒反応モデル
- 図 29 水分濃度の影響
- 図 30 アンモニア濃度の影響
- 図 31 アンモニア酸化反応の Arrhenius プロット
- 図 32 触媒反応器概要
- 図 33 酸化触媒出口濃度予測(排ガス温度 300℃、排ガス流量 716 L/min)
- 図 34 酸化触媒出口濃度予測(排ガス温度 350℃、排ガス流量 716 L/min)
- 図 35 後処理装置による未燃アンモニア低減
- 表1 燃料噴射ノズル一覧
- 表2 アンモニア燃料船に関連する基準
- 表3 低引火点燃料と関連規則の関係

#### 1. 本研究の目的

低炭素社会実現には、再生可能エネルギーの大規模利用や水素社会の普及が必要とされる。しかし、 水素は貯蔵や輸送に関して、技術的ハードルを多く抱えており、純水素を使用したシステムの構築は 困難をともなう。再生可能エネルギーを大規模に利用するためには、エネルギーを水素として含む化 学物質(エネルギーキャリア)に変換し、これを運搬・貯蔵し、必要な時にエネルギーに戻すシステ ムの構築が必要だが、体積当たりの水素貯蔵量が大きく容易に液化可能なアンモニアは、製造・輸送・ 貯蔵まで一貫した技術が整備されており、エネルギーキャリアとしての可能性を十分に秘めている。

エネルギーキャリアとしてのアンモニアが普及すれば、製造地から消費地にアンモニアを輸送する アンモニアタンカーが必要となるが、こうした船舶におけるアンモニアの燃料としての直接利用は、 輸送中の温暖化ガス排出低減に効果がある。加えて、IMO(国際海事機関)は、温暖化ガス排出低減を 積極的に推進するため、国際海運全体が目指すべき温暖化ガス排出削減に関する将来ビジョン、目標 及び実現のための対策等を検討してきており、2018に「GHG 削減戦略」を取りまとめた。これにより、 2008年をベースに、2030年までに国際海運全体の燃費効率を40%改善し、2050年までに GHG 排出量 を半減させ、最終的には、今世紀中のなるべく早期に GHG 排出ゼロを目指すことが合意された。この ため、一般の船舶においても、燃料としてのアンモニアの利用は、当該戦略への対応のための有効な 方法である。

舶用機関では、天然ガス燃料を利用するために、主燃料が天然ガスで着火用の燃料が液体燃料とい う重油とメタンの混焼エンジン(デュアルフューエル機関)が開発されている。この概念を活用し、 主燃料を液体燃料としその燃焼により吸気に混合したアンモニアを燃焼させるシステムを考える。こ のシステムは容易に既存エンジンに適用可能である。しかし、このシステムでは、未燃アンモニア・ 窒素酸化物の抑制等、排ガス性状の制御が主要な課題となると考えられる。これらを制御する因子と して、主燃料の噴射圧力、噴射タイミング等があり、これらと排ガス性状の関係を明らかにしておく ことが、アンモニア混焼エンジン開発の基礎として重要である。

本課題はアンモニア混焼船舶用エンジン開発のための調査研究であり、重油を主燃料とするディー ゼルエンジンにおけるアンモニア混焼技術の基礎を明らかにし、アンモニア混焼ディーゼルエンジン の実機設計の指針を得ることを目的とする。また、舶用エンジンにおいては環境規制対応のため排ガ ス後処理装置の導入が必要になる場合もあるが、アンモニア混焼ディーゼルエンジンからの排ガスが これら装置に及ぼす影響等に関する知見を得ることも目的とする。この基礎研究をベースに、市場調査 や舶用機関としてのルール上の問題点の調査を実施することで、舶用エンジンの開発計画を立案する。

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所は、ディーゼル機関の吸気に アンモニアガスを混合し、燃焼生成物・筒内圧力の計測及び燃焼解析を行い、舶用ディーゼル機関に おけるアンモニア燃焼方式の検討を行う。研究概要を図1に示す。

ディーゼル機関の吸気にアンモニアを混合すると、アンモニア・空気混合気が燃焼室に導入され、そ こに液体燃料が噴霧される。供給したアンモニアは、液体燃料の噴霧火炎の近傍または燃焼室内部で 燃焼する。ディーゼル機関の燃焼室内は、複雑な流れをもつ乱流場であるだけでなく、噴霧された燃 料は不均一な濃度場を形成し、高速で往復運動するピストンにより温度・圧力等の雰囲気条件も急速 に変化する。このように複雑で再現が困難な非定常状態におけるアンモニアの燃焼特性の解明には、 燃焼室の圧力(筒内圧)の変化、発熱量の推定、排ガスの温度・成分の計測等から類推する必要があ る。このために、単気筒の試験エンジンを用いて、パラメータとしてアンモニア混合比、燃料(軽油) の噴射圧力・タイミング等を変化させた燃焼試験を行い、これらのパラメータと熱効率及び排ガス性 状(未燃アンモニア、窒素酸化物、一酸化炭素等の排出量)との関係を調べる。これらの結果から、 液体燃料の着火・燃焼特性、アンモニアの燃焼特性と未燃アンモニアの残留、窒素酸化物の生成等の プロセスを考察し、適正な燃焼が得られる条件範囲を推定する。また、排ガス後処理装置への影響・ 効果も調べる。具体的には、以下の課題を実施する



図1 研究概要図

1) 液体燃料の着火・燃焼特性

アンモニア混焼エンジンでは、液体燃料がアンモニア・空気混合気に噴霧される。アンモニア・空気 混合気中では、液体燃料の着火遅れ時間や燃焼期間が、通常の空気のみの場合から変化すると考えら れる。これら液体燃料の着火・燃焼特性の変化は、機関の性能に大きく影響する項目である。アンモ ニアの供給量が、軽油の着火・燃焼特性に与える影響を調べる必要がある。

#### 2) 未燃アンモニア

ディーゼル機関の吸気にアンモニアを混合し、燃料の一部として利用する場合、供給したアンモ ニアは、筒内で混合気を形成し液体燃料の噴霧・火炎の内部または近傍で燃焼すると考えられ、ア ンモニアの燃焼は、液体燃料噴霧の状態とアンモニア混合気の状態に大きく影響される。燃焼を強 化し、未燃アンモニアを低減するためには、液体燃料噴霧の状態がアンモニアの燃焼に与える影響 を、アンモニア混合気形成の影響も含めて調べる必要がある。本研究では、燃料噴射弁等を変更す ることで、燃料の噴霧状態等を変化させ、未燃アンモニアの低減を図る方法を検討する。さらに、 既存の排ガス後処理装置による未燃アンモニア削減の効果についても検討する。

3) 窒素酸化物

通常、ディーゼル機関から排出される窒素酸化物は主に、高温燃焼により空気中の窒素を起源と する NO と NO<sub>2</sub>である。アンモニアを吸気に混合し燃焼させた場合、燃料起源の窒素酸化物が生成 することから、NO、NO<sub>2</sub>排出量の増加に加えて N<sub>2</sub>O を排出する可能性が指摘されている。そのた め、燃焼状態を制御することにより、窒素酸化物の排出特性に与える影響を調査し、窒素酸化物低 減の方法を検討する。

4) 船舶への搭載を想定した安全性の検討

船舶用燃料としてアンモニアを使用する場合、船舶の安全に関する諸規則にしたがった安全性の検 討が必要である。アンモニアを燃料とする場合の規則は整備されていないため、他のガス燃料の例を 調査して、安全性の検討を行う。合わせて、船上での取扱い等、船舶への適用性についての調査を行 う。

2. 研究開発目標とマイルストーン

舶用機関に用いられる4ストロークディーゼル機関をベースとしたアンモニア混焼エンジンおいて、 熱量比 20%のアンモニア混合時に燃焼効率 95%、排ガス後処理系後流での未燃アンモニアが 40ppm 未 満となることを目標に、燃焼制御を中心としたシステム構成の可能性を検討する。

年度毎のマイルストーンは以下の通りである。

- ▶ H29 年度:熱量比 20%までのアンモニアガスを吸気に混合し、ディーゼル機関を運転。
- ▶ H30 年度:熱量比 20%のアンモニアガス混合において燃焼効率 95%を達成する燃焼方式と排ガス 後処理装置出口でアンモニア 40ppm 以下になるシステムの提案。
- 3. 研究実施内容
- 3-1. 実験装置
  - 1) 実験装置概要

実験装置の概要図及び全体図を図2及び3に示す。試験用単気筒ディーゼル機関(以下、機関)の 出力軸は、電気動力計に接続され、設定した回転速度になるように自動的に負荷が増減される。実験 では、機関を軽油のみを用いて運転後、アンモニアガス噴射を行った。アンモニアガス及び軽油の噴 射量を調整することで、トルク及び発熱量割合を調整した後、測定を実施した。なお、各測定は、冷 却水機関出口温度及び潤滑油機関出口温度の変化が十分小さくなったことを確認して行った。排気成 分については、FID 式炭化水素分析器及び FTIR 式排ガス分析器を用いて濃度を測定した。また、排 気中のスモークは、フィルタスモークメータを用いて、汚染度を測定した。





図3 実験装置全体図

2) アンモニア供給設備、測定器機の設置

上記の試験用単気筒ディーゼル機関の吸気に、アンモニアを混合するためのアンモニア供給設備の構築を H29 年度に行った。本設備は、試験用単気筒ディーゼル機関(出力 7.7kW)の 20%出力(1.54kW)以上の出力を得られるアンモニアガスを、50 kg 液化アンモニアタンクから供給可能である。アンモニアの低位発熱量を 18592 J/g とすると、約 21 l/min (0℃、1 気圧)の吐出流量が必要である。このとき、蒸発潜熱は、0.34 kW である。一定流量を安定した圧力で供給するために、液化アンモニアタンクを温水により保温する構造とした。

図4に構築したアンモニア供給設備の写真を示す。2本の保温された液化アンモニアタンクの吐出口



図 4 (a) アンモニア供給設備 (液化アンモニアタンク及び温水ジャケッ 弁を通り試験用単気筒ディーゼル機関のインテー

は、連結管により連結されており、2 本のボンベ から気化したアンモニアガスは加熱・保温された レギュレータに導かれる。アンモニアガスは、レ ギュレータにより減圧後に、フィルタ・ボールバ ルブ・流量計・バッファタンク・供給遮断用電磁



図 4 (b) アンモニア供給設備 (流量計及びバッファタンク)

クパイプに設置されたガスインジェクタに供給される。なお、配管には 1/4 ステンレスパイプ及び耐圧 PTFE フレキシブルチューブを用いた。

筒内圧力計、吸気圧力計、排気圧力計及びクランクアングルセンサ(1回転毎720パルス)を、燃焼解析のために設置した。筒内圧力計及びクランクアングルセンサは、専用アダプタによりそれぞれ、シリンダヘット並びにクランク軸出力端反対側に設置した。図5~7に設置した測定器を示す。



図5 筒内圧力計及び吸気圧力計



図6 排気圧力計

図7 クランクアングルセンサ

燃焼解析では、50 サイクル分の筒内圧力、吸気圧力及び排気圧力をそれぞれ平均したものを解析に用いた。また、筒内圧力の補正として、50 サイクル分を平均した筒内圧力に、筒内圧力がオーバラップ期間の吸気圧力と排気圧力の平均値と同じになる値を加算した。

#### 3) 電子制御燃料噴射弁の設置

未燃アンモニアの低減に関して、これまでの知見<sup>1)</sup>から、限定的な条件ではあるが軽油のパイロット 噴射(主噴射の前に軽油を噴射すること)が有用であることを確認している。本研究では、軽油のパ イロット噴射の未燃アンモニアの低減効果を向上させるため、H30年度に軽油パイロット噴射の制御 が可能なソレノイド制御による電子燃料噴射弁を設置した。電子燃料噴射弁へ送油される軽油の加圧 及び蓄圧には、既設の燃料ポンプ及び蓄圧器<sup>2)</sup>を用いた。電子燃料噴射弁には Bosch 製 0445110259 を 使用した。図8にシリンダヘッドに設置した電子燃料噴射弁、図9に電子燃料噴射のコントローラを 示す。電子燃料噴射弁の制御用マイコンには、Renesas Electronics 製の YSSKS7G2E30 を用いた。制御 用マイコンは、噴射開始のクランク角度及び開弁時間の設定が可能で、1 サイクル中に3 回の噴射信号 をインジェクタドライバに送信することができる。電子燃料噴射弁のソレノイドは、制御用マイコン からの噴射信号に合わせてインジェクタドライバにより駆動され、インジェクタドライバによりソレ ノイド駆動電圧が調整される。



図8 シリンダヘッドに設置された 電子制御燃料噴射弁



図9 電子燃料噴射コントローラ

3-2. アンモニア混焼予備試験

構築した実験装置の確認を行うため、H29年度に予備試験を実施した。

機関の舶用負荷率 100%(1500 min<sup>-1</sup>、51 Nm)においてのアンモニア混焼結果を図 10~12 に示す。図 10 は、アンモニアの供給熱量割合及び未燃アンモニア割合を示している。アンモニアの供給熱量割合は、 下記の式により求めた。

$$Heat \ contribution_{NH3} = \frac{LHV_{NH3}}{LHV_{diesel} + LHV_{NH3}}$$
(a)

ここで、Heat contribution:供給熱量割合、LHV:低位発熱量 添え字は、NH<sub>3</sub>:アンモニア、diesel:軽 油である。アンモニアガス供給量を 35 l/min とした場合、アンモニアからの供給熱量が 30%以上になる ことを確認した。

また、未燃アンモニア割合は、供給したアンモニアガス量に対する排気中アンモニアの量である。また、未燃率は、アンモニア供給量によらず、ほぼ一定で14%であった。

図 11 に筒内圧力から解析した熱発生率並びに燃料高圧管内圧力を示す。アンモニア供給量の増加に 合わせて出力を一定に保つために軽油噴射量を減らしている。そのため、燃料高圧管内圧力は、アンモ ニア供給量の増加と共に最高圧力が低下している。また、筒内圧力及び熱発生率から、着火遅れ時間が、 アンモニア供給量の増加と共に増加していることが分かる。さらに、僅かではあるが拡散燃焼による熱 発生の低下と後燃え期間中の熱発生の増加が併せて確認できる。

図 12 にアンモニア供給量に対する熱効率及び排気成分の変化を示す。同図に示される熱効率は、ア ンモニアと軽油の合計の供給熱量に対する出力の割合である。アンモニア供給量の増加と共に熱効率の 低下が見られる。アンモニア供給量 35 l/min のとき(熱量割合 30%)の場合、熱効率は、3%ポイント 程度低下している。また、アンモニア供給量の増加と共に、H<sub>2</sub>O、CO、N<sub>2</sub>Oの増加、CO<sub>2</sub>の低下が確認で きる。N<sub>2</sub>O は、強い温室効果を持つ物質であり、その排出量によっては、CO<sub>2</sub>排出量低減による温室効 果ガス排出量削減効果を相殺する恐れがある。一方、NOx は、アンモニア供給量の増加に伴い排出量が 一度増加するが、アンモニア供給量をさらに増加させると減少する。NOx の生成は、窒素原子を持つア ンモニアの増加による Fuel NOx の増加、燃焼温度の変化による Thermal NOx の変化に加えて、NH<sub>3</sub> と NOx による無触媒脱硝反応といった現象が、複雑に関係していると考えられ、機関の運転条件によって、 大きく変化する可能性が考えられる。



3-3. アンモニア混焼機関の運転状態が大気汚染物質排出量に及ぼす影響

予備試験の結果、目標としていたアンモニア供給量が確保できることが確認されたため、エンジンの 運転条件の排ガス特性等への影響を確認した。

アンモニアの供給熱量割合を20%に固定し、機関の回転速度とトルクを変更した場合の熱効率及び排気成分の変化を図13に、各回転速度においてトルク変化が筒内圧力に及ぼす影響を図14及び15に示す。また、図13には、軽油のみの運転結果を同時に示している。アンモニアの供給熱量割合は、回転速

度及びトルクによって軽油の消費量が変化するため、各測定点において調整をした。実験において、(a) 式から得られるアンモニアの供給熱量割合は 19.5~20.6%であった。

図 13 に示されるようにトルクの増加と共に、回転速度によらずアンモニア、N<sub>2</sub>O は低減しているこ とが分かる。また、1000 rpm の場合、低いトルクの場合においても、1500 rpm と比較して未燃アンモニ アの排出量が少ないことが分かる。CO、THC 及びスモークは、1000 rpm の場合にトルクの増加と共に 顕著な増加が見られ、軽油のみの運転の場合も同様の傾向が見られる。これは、軽油噴霧の予混合燃焼 の後に続く拡散燃焼過程において、噴射された燃料と燃焼室内の空気との混合過程が影響していると考 えられる。1000 rpm の場合、1500 rpm に比べてピストン速度が遅いため、燃焼室内のスキッシュによる 空気流動が比較的弱くなるが、トルクの増加と共に燃料噴射量は増加し、燃料と空気との混合が十分で なくなった可能性が考えられる。

一方、図 14 及び 15 を比較したとき、トルク 20 Nm の場合、1000 rpm の筒内最高圧力が、1500 rpm 時 に比較して高いことが分かる。これは、燃焼室内の平均温度が高かったことを示している。また、筒内 圧力変化から求めた熱発生率が示す燃焼開始と燃焼終了は、回転速度によらず上死点付近から 40 deg. ATDC までとなっている。クランク角度 1 度あたりの時間は、回転速度が低いほど長くなるため、1000 rpm の場合、燃焼期間は、1500 rpm よりも長い。これらのことから、1000 rpm でトルクが低くても未燃 アンモニアの排出量が少ないのは、比較的高温及び長時間の燃焼過程中にアンモニアの燃焼が進んだこ とによるのではないかと考えられる。

8



図13 熱効率及び排気成分の変化

図15 筒内圧力及び燃料噴射圧力(1500 rpm)

3-4. 軽油噴射ノズルの変更がアンモニア混焼時の大気汚染物質の排出に及ぼす影響

本研究におけるアンモニア供給量範囲内の空気過剰率は 10~25 程度であり、この希薄な混合気のみ で着火・燃焼しているとは考えにくい。アンモニアの燃焼は主に、筒内に噴射された軽油噴霧によるデ ィーゼル燃焼の高温部分において起こっていると考えられる。そこで、軽油の噴霧状況の変化が未燃ア ンモニアの低減に繋がるかを検討するために、燃量(軽油)噴射ノズルを変更して実験を行った。本実 験で使用した燃料噴射ノズルの一覧を表1に示す。ノズルの名称は、噴孔数と噴孔径を組み合わせたも のとした。4-031 ノズルは、通常使用しているノズルである。本実験では、このノズルを基準として、噴 孔数を増やした 5-029 ノズル(噴孔数 5、噴孔直径 0.29 mm)及び噴孔径を小さくした 4-028 ノズル(噴 孔数 4、噴孔直径 0.28 mm)を使用した。図 16 及び 17 に筒内圧力から解析した熱発生率並びに燃料高 圧管内圧力、ノズルが熱効率及び排気成分に及ぼす影響を示す。なお、機関は、アンモニア供給量及び 経由噴射量を変化させて、舶用 75%負荷率(1363 min<sup>-1</sup>、42 Nm)において運転した。図 17 に示される ように、噴射弁の変更による筒内圧力の変化は僅かである。また、排気成分は、NOx や CO は噴射弁の

変更により他の排気成分に比べて大きく影響を受けている。しかし、N2O及びNH3を含むその他の成分は、ほとんど影響されないことが確認できる。

表1 燃料噴射ノズル一覧

ノズル 名称	噴孔間角度 [deg.]	噴孔数 [-]	噴孔径 [mm]	総噴孔面積比 [-]
4-031	78	4	0.31	1.00
5-029	78	5	0.29	1.09
4-028	78.5	4	0.28	0.82





3-5. 水素及びメタンの混合がアンモニア混焼時の大気汚染物質の排出に及ぼす影響

アンモニアの直接燃焼利用では、アンモニアの難燃性を緩和するためにアンモニアと水素やアンモニ アと天然ガスを混合した混焼が試みられている。特に水素は、機関の排熱と触媒を組み合わせてアンモ ニアから生成が可能なため、利用しやすい。本試験では、機関の吸気にアンモニアと併せて水素または メタンを混合し、排気成分の変化を確認した。機関へのアンモニア供給量を 23 L/min (熱量割合 27%) 一定とし、一定流量の水素またはメタンを吸気に混合した。また、機関の回転速度及び負荷率は、軽油 噴射量を変化させることで、舶用 75%負荷率(1363 min<sup>-1</sup>、42 Nm)一定として運転した。図 18 及び 19 に、水素及びメタンガス混合による排気成分の変化を示す。図 18 は、図 19 に示される結果を、アンモ ニアのみの場合に対する比率で示している。水素を混合した場合、未燃アンモニアの低減効果は、1 割 程度あることが分かる。同時に、N2O と NOx を増加させていることが分かる。メタンガスを混合した場 合は、未燃アンモニアの低減効果は見られなかった。また、水素と同様に N2O と NOx を増加させてい ることが分かる。メタンについては、FTIR 分析器により測定可能であったため、未燃のメタンが測定さ れている。





図19 水素及びメタンガス混合の効果(比較表示)

3-6.パイロット噴射によるアンモニア燃焼効率改善

アンモニアの供給熱量割合を20%に調整し、電 子燃料噴射を用いてパイロット噴射のタイミング を変更した場合の熱効率及び排ガス成分の変化を 図 20 に、各回転速度でのパイロット噴射による筒 内圧力の変化を図 21 及び 22 に示す。パイロット 噴射は、開弁時間を 500 ms に設定し、機関の出力 を一定に保つために主噴射の開弁時間を変更し た。実験において、アンモニアの供給熱量割合は 19.4~21%であった。図 20 には、主噴射のみの結 果を図中の右端に示している。パイロット噴射の タイミングを進角していくと、未燃アンモニアが 低減され、アンモニア燃焼効率が 98%程度(アン モニア未燃率 2%程度) まで改善されていること が分かる。ただし、パイロット噴射タイミングー 30 deg. ATDC の場合は、アンモニアの燃焼効率改 善効果は見られない。また、パイロット噴射時に は、アンモニアの燃焼効率改善効果と共に、NOx 及び THC の増加が見られる。 図 21 及び 22 に示さ れるように、パイロット噴射の時期によらず、筒 内最高圧力は上昇している。また、大きな熱発生 が最初に見られるクランク角は、-15 deg. ATDC あ たりであり、同程度であることが分かる。パイロ ット噴射タイミング-30 deg. ATDC の場合は、筒 内最高圧力が高いにも関わらず、アンモニア燃焼





効率改善効果が得られていないことを考慮すると、早期の軽油噴射が、アンモニアの燃焼効率改善に 寄与していると考えられる。早期に噴射された軽油は、着火までに燃焼室内のアンモニアを含む空気 と混合することができる。この混合気の燃焼過程で、アンモニアの燃焼が進んだと考えられる。本結 果から、燃焼過程においてアンモニアと軽油の相互作用があることが示唆される。

3-7.酸化触媒の性能予測

#### 1) 概要

未燃アンモニアの低減方法として、燃焼室内において低減させる方法の他、触媒を用いた排気後処 理による方法がある。本研究では、脱硝触媒(SCR 触媒)により NOx と反応させる方法と酸化触媒 によりアンモニアを酸化させる方法を検討した。脱硝触媒は、これまでの研究開発 <sup>30</sup>によりディーゼ ル機関の排気雰囲気中での性能が明らかになっている。しかし、酸化触媒については、ディーゼル機 関の排気雰囲気中での性能が不明であるため、模擬ガスを用いた触媒の単体性能試験を実施した。 2)実験装置

図 23 にガス流通式の触媒試験装置概要を示す。各ガスシリンダからのガスは、マスフローコント ローラにより流量制御され、混合される。混合ガスは、蒸発器を通り反応器に供給される。蒸発器に おいて、蒸発した水が混合ガスに添加されることで、水分を含む模擬排ガスが作製される。模擬排ガ スの反応器前後のガス成分の濃度を比較することで、触媒性能を測定することができる。酸化触媒は、 断面 150mm×150mmの正方形の形状,奥行 50mm,目開き 45~50[cell/inch<sup>2</sup>]程度のもの(特注品) を用いた。試験用の触媒は、購入品から 5×5 セル(20×20mm)長さ 50 mmの試験片を作製し使用 した。



図23 ガス流通式触媒試験装置概要

#### 3) 実験結果

図 24 に温度に対するアンモニアの酸化率を示す。模擬ガス組成は、機関の実験結果を基に、酸素 10%、アンモニア 1000ppm、水分 5%とした。同図には、同様の模擬ガス組成に NO1000ppm を追 加した場合の結果も示されている。また、触媒出口の NO 及び N<sub>2</sub>O 濃度を図 25 及び 26 に示す。模擬ガス流量は 13 L/m (0℃、1 気圧)とした。図 24 から、触媒入口にアンモニアと共に NO が存在 する場合、アンモニアのみの場合と比較してアンモニアの酸化率が高くなっている。しかし、図 26 に 示されるように、触媒出口ガス中に温暖化係数の高い N<sub>2</sub>O の発生が確認できる。一方、アンモニアの みの場合、図 25 及び 26 から触媒上において NO や N<sub>2</sub>O の生成は僅かであることが分かる。この結 果から、酸化触媒による NOx や N<sub>2</sub>O の生成を避けるために、酸化触媒は脱硝触媒の後流に設置する こととした。脱硝触媒において、未燃アンモニアと NOx を反応させることで、酸化触媒に流入する ガスから NOx を取り除くことを想定した。

図 27 に、触媒流入ガス中の水分が酸化触媒のアンモニア酸化性能に及ぼす影響を示す。水分の濃度の増加により、アンモニア酸化性能が低下していることが分かる。アンモニア混焼時には、アンモニアの燃焼により水分が生成されるため、酸化触媒の性能予測には、水分濃度による性能変化を考慮する必要がある。



測定条件 ガス流量(0 deg., 1 atm): 13 L/min 設定アンモニア濃度: 1000 ppm 設定NO濃度: 0 ppm or 1000 ppm 設定酸素濃度: 10 % 設定水分濃度: 5 % ガス温度: 290~380 deg.

図24 酸化触媒のアンモニア酸化性能



図27 水分がアンモニア酸化性能に及ぼす影響

### 4) 酸化触媒の性能予測式

酸化触媒を用いて、機関の排ガスを処理する場合のアンモニアの酸化性能を予測するために、上述 のガス流通式触媒試験装置による性能試験の結果を整理し、アンモニア酸化性能の予測式を作成した。 予測式の作成過程では、図 28 に示すような触媒反応モデルを仮定し、流入するガスの濃度分布及び 流速分布は、一様であることを仮定した。



図 28 中、C<sub>NH3 in</sub>:触媒入口アンモニア濃度[mol/m<sup>3</sup>]、C<sub>NH3 out</sub>:触媒出口アンモニア濃度 [mol/m<sup>3</sup>]、

 $C_W$ : 触媒出入口水分 [mol/m<sup>3</sup>]、V: 触媒体積 [m<sup>3</sup>]、t: ガス通過時間 [s]である。また、水分濃度は 触媒出入口において、その濃度が変化しないことを仮定した。

ガス流通式触媒試験装置において使用した触媒は、機関の後処理装置として使用する触媒を切り出 したものであるので、下記のように触媒体積当たりの酸化速度として性能を整理した。アンモニアは 触媒出口において減少しているので、酸化速度の符号は負とした。

$$r = -\frac{J}{V} \tag{1}$$

ここで、r: 触媒体積当たりの酸化速度(比速度) [mol/m<sup>3</sup> s]、<math>J: 酸化速度 [mol/s]体積当たりの酸化速度rは、ガス通過時間当たりのアンモニア濃度変化として表される。

$$r = -\frac{1}{V} \times \frac{V \times \left(C_{NH_{3}in} - C_{NH_{3}out}\right)}{t} = -\frac{dC_{NH_{3}}}{dt}$$
(2)

また、アンモニアの酸化速度は、流入する水分濃度とアンモニア濃度の関数であることを仮定し下記の反応速度式を使用した。

$$r = kC_W^{\alpha}C_{NH3}^{\beta}$$
 (3)  
ここで、 $k : -$ 次反応速度定数[1/s]、 $C_{NH3} : T \rightarrow \pi \pi$  [mol/m<sup>3</sup>]、 $\alpha : 反応次数$  [·]、 $\beta : 反応次$ 数 [·]

図 29 及び 30 に、水分濃度及びアンモニア濃度に対するガス通過時間当たりのアンモニア濃度変化 を示す。両図に示されるように、ガス通過時間当たりのアンモニア濃度変化は、水分濃度の-0.07 乗 に、アンモニア濃度の1乗に比例していることが分かる。よって、式(3)中の反応次数α及びβは-0.07 及び1とした。

式(2)を(3)に代入し、積分することで下記式を得ることができる。

$$ln \frac{C_{NH3_out}}{C_{NH3_in}} = -kC_W^{-0.07}t$$
(4)

図29 水分濃度の影響

図30 アンモニア濃度の影響

反応速度定数の温度依存は Arrhenius 式と呼ばれる次式で表されることが知られている。  $k = k_0 e^{-(\frac{E}{RT})}$  (5) ここで、 $k_0$ :前指数因子 [-]、E:活性化エネルギー [J/mol]、R:気体状態定数 8.314 [J/mol K] T:絶対温度 [K]である。

式(5)は、両辺の対数を取ることで次式のようになる。

 $lnk = lnk_0 - E/RT \tag{6}$ 

前指数因子 $k_0$ 及び活性化エネルギーEは、Arrhenius プロットの切片及び勾配として算出することが できる。図 31 にアンモニア酸化反応の Arrhenius プロットを示す。反応速度定数の算出には、式(3) を使用した。図に示す近似式より $k_0 = 1741052$ 、E = 53319を得た。



図31 アンモニア酸化反応のArrheniusプロット

式(4)に式(5)を代入することで、アンモニア酸化性能の予測式が得られる。

 $ln\frac{C_{NH3_out}}{C_{NH3_in}} = -k_0 e^{-(\frac{E}{RT})} C_W^{-0.07} t$ (7)

また、各定数を代入し、触媒出口アンモニア濃度を算出するように変形すると、次式になる。

 $C_{NH3_out} = C_{NH3_in} \times e^{-1741052e^{-(\frac{6413}{T})}} C_W^{-0.07} t$ (8)

5)酸化触媒による未燃アンモニアの除去性能予測

本研究で使用している排ガス後処理装置の触媒反応器の概要を図 32 に示す。触媒後処理装置は、酸化触媒による NOx や N<sub>2</sub>O の生成を避けるために、脱硝触媒の後流に酸化触媒を設置している。脱硝触媒及び酸化触媒は、一般に復旧している高さ及び幅が 150 mm の物を使用し、それぞれの長さは 224 mm 及び 50 mm である。酸化触媒は、4 段設置しており合計で酸化触媒の長さは 200 mm である。

酸化触媒に流入する未燃アンモニアは、脱硝触媒により NOx と反応した残存分である。しかし、 アンモニアの混焼及びパイロット噴射の影響により NOx 濃度が変化するため、脱硝触媒後流の未燃 アンモニアを正確に予測することは難しい。そこで、機関の代表的な排ガス温度 300℃及び 350℃に おいて、酸化触媒後流においてアンモニア濃度 40 ppm 以下を達成するための酸化触媒入口アンモニ ア濃度を予測した。式(8)を用いて、未燃アンモニアの除去性能予測を予測した結果を図 33 及び 34 に 示す。機関の試験結果を基に、排ガス流量は 716 L/min (0℃、1 気圧)とした。図 33 に示すように、 排ガス温度が 300℃のとき、触媒長さが 200 mm の場合は、酸化触媒入口アンモニア濃度を 300 ppm 以下にしなければ、酸化触媒後流において排出されるアンモニアを 40 ppm 以下にできないことが分 かる。しかし、排ガス温度 350℃の場合は、200 mm の触媒長さにおいて 3000 ppm のアンモニアを 40 ppm 以下に低減できることが分かる。



図32 触媒反応器概要



3-8. 排気後処理装置による未燃アンモニアの低減効果

パイロット噴射の適用による未燃アンモニアの低減効果と触媒を用いた排ガス後処理による未燃 アンモニアの低減効果を図 35 に示す。図 32 に示されるように、酸化触媒での N<sub>2</sub>O の生成を防ぐた めに、酸化触媒は脱硝触媒の後流に設置されている。パイロット噴射によりアンモニアを 1000ppm 程度まで低減した場合、NOx 排出量の増加があった。そのため、前段の脱硝触媒において、機関から 排出された未燃アンモニアは、ほぼ全て消費されている。また、酸化触媒には脱硝触媒において低減 されなかった NOx が流入しているが、N<sub>2</sub>O の増加はない。これは、NOx とアンモニアが共存してい ないためであると考えられる。また、酸化触媒では、CO の低減効果も見られる。



図35 後処理装置による未燃アンモニア低減

1000 rpm, 60 Nm, Rail Press.: 100MPa, Main: 1100 µs (-10 deg.ATDC), Pilot: 400 µs (-50 deg.ATDC)

3-9. アンモニア燃料船に係わる既存規則の調査

本項では、アンモニア燃料の利用拡大を図るため、アンモニア燃料船の実現に必要な要件を、既存の 船舶の安全基準及びアンモニアの物性を考慮して明らかにする。表2は、今回調査した既存の船舶に適 用される基準の一覧を示している。同表は、アンモニア運搬船や LNG 燃料船など、アンモニア燃料船 に関連があると想定される基準が含まれている。

基準名	概要
SOLAS 条約	海上における人命の安全のための国際条約(すべての船舶に共通)
IGF コード	国際ガス燃料船安全コード(LNG 燃料船等の基準)
IGC コード	液化ガスの撒積運送のための船舶構造および設備に関する国際規制(LNG タンカー、アンモニアタンカー等の基準)
IMDG コード	国際海上危険物規程(危険物輸送船の基準)→アンモニアボンベ輸送

ŧ.	2	7	1/1-	-7	・歴史	「向八ファ	胆油イ	- Z	甘淮
衣	Δ		イモ	-)	邓尔	「万口(し	渕理 9	$\sim$	基毕

SOLAS 条約は、500 総トン未満の貨物船等を除く、すべての国際航海に従事する船舶に適用される基 準であり、船舶の安全基準のベースとなっている。また、IGF コード、IGC コード及び IMDG コードは、 LNG 燃料船、LNG 運搬船、アンモニアタンカー、またはアンモニアボンベ輸送を行う船舶に対して、 SOLAS 条約と共に義務付けられる規定である。船舶に使用可能な燃料に関する規定は SOLAS 条約で定 められており、燃料の引火点 60℃以上のものが使用可能とされている。一方で、近年、船舶においても 石油代替燃料への対応を可能にするため、従来 SOLAS 条約で使用できなかった引火点が 60℃未満の低 引火点燃料を対象とした安全基準として、IGF コードが追加された。表3は、代表的な低引火点燃料と これらの規則の関係を示している。現時点では、IGF コードは LNG のみを対象とした要件が整備され ており、他の燃料については、SOLAS 条約の代替設計として個々の船舶に対して旗国政府の承認が必要 とされる。

引火点	燃料の種類		主機関で使用する際に適用される規則						
(Closed cup)	C重油(70℃以上)		SOLAS条約						
60°C	A重油(60℃以上)								
40°C	軽油(45℃以上)		IGFコード *1 天然ガス以外の燃料は、SOLAS条約の代						
42 C	エタノール(約14°C)	低引火	替設計として、旗国政府承認。(天然ガス燃料						
റ°റ	メタノール(約12℃)	点燃料	の要件を準用)						
00	ガソリン(-40℃以下)		*2メタノール/エタノール燃料船ガイドライン						
	天然ガス(約-188℃)		(策定中)						

表3 低引火点燃料と関連規則の関係

船舶の燃料にアンモニアを使用する場合、その引火点が問題となるが、現状の IMDG コードにおいては、 引火点が 60℃以上の引火性がない毒性ガスと位置づけられている。このため、アンモニア燃料船は、従 来の油燃料船と同等以上の安全性が担保できること、及び SOLAS 条約の代替設計として個々の船舶に 対して旗国政府により承認されることが必要であると考えられる。このため、アンモニア燃料船におい て、従来の油燃料船と同等以上の安全性を担保するために、可燃性ガス及び毒性ガスであることを考慮 する必要があると考えられる。以下に、アンモニア燃料船の実現に向け、SOLAS 条約に追加されるガイ ドラインを想定した場合の検討項目案の例を示す。

✓ 暴露甲板から下の区画、密閉区画、人がいる区画におけるアンモニア燃料管は二重管

▶ (メタノール燃料船のガイドラインを参考)

- ✓ 換気方法(回数、検知器の仕様、換気装置の使用材料(Cu、 Zn 禁止)など)
  - ▶ (アンモニア運搬船の輸送規則(IGC コード)を参考)
- ✓ 蒸気の滞留や拡散を考慮した換気装置の設置位置を最適化する解析手法
- ✓ 漏洩時の防護方法(防護服の設置、避難区画など)
  - ▶ (IGC コードを参考)

3-10. まとめ

本研究では、舶用ディーゼル機関へのアンモニア燃料の適用を目的として、ディーゼル機関の吸気 にアンモニアを供給し液体燃料との混焼を想定した実験を、試験用の単気筒ディーゼル機関を用いて 行った。実験では、アンモニアの燃焼効率、NOx 発生を含む排ガス性状等を調べると共に、特に大き な課題と考えられた未燃アンモニアへの対応方法を、排ガス後処理装置との組み合わせを含め、検討 した。また、併せてアンモニア燃料船に係わる既存規則の調査も行った。

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 定格負荷率において、アンモニア熱量比 30%での機関運転が可能な実験システムを構築した。構築 後に行った予備試験の結果、機械式燃料噴射装置を用いた通常運転時、定格負荷率におけるアンモ ニア燃焼効率は 86%であった。また、温室効果を持つ N<sub>2</sub>O の排出量増加があった。
- (2) アンモニア熱量比 20%において、通常の運転からはずれた条件で運転を行い、回転速度・トルクが アンモニア、N<sub>2</sub>Oの排出に与える影響を確認した。その結果、トルク増加に伴いアンモニア及び N<sub>2</sub>Oの排出量が減ることを確認した。また、トルクが小さい場合、アンモニアの排出量は、低回転 速度の方が高回転速度の場合よりも少なかった。
- (3) アンモニア燃焼効率の改善を目指し、筒内の軽油燃焼場の変更を行うために軽油噴射ノズルを変更 した実験を行った。しかし、通常の運転条件の範囲において、アンモニアの燃焼効率向上や N<sub>2</sub>O の 生成低減に対しする十分な効果はなかった
- (4) アンモニア燃焼効率の改善を目指し、アンモニアに加えてメタンや水素を混合した実験を行った。 水素を混合した場合、僅かにアンモニア燃焼効率が向上したが同時に N<sub>2</sub>O の生成増加があった。
- (5) アンモニア燃焼効率の改善を目指し、電子制御噴射弁によるパイロット噴射を用いた実験を行った エンジン回転数 1000 及び 1500 rpm、トルク 60 Nm の運転点において、アンモニア燃焼効率 98% を達成した。
- (6) 排ガス後処理装置として脱硝触媒及び酸化触媒を検討した。酸化触媒については、ディーゼル機関の排ガス中での性能が明らかでは無いため、触媒試験片を用いて性能測定を実施し、アンモニア酸化性能の予測式を作成した。また酸化触媒のアンモニア酸化性能は、水分濃度の増加に伴い低下することを確認し、さらにアンモニアと共に NO が存在する場合、酸化触媒において N<sub>2</sub>O が生成されることがわかった。
- (7) 軽油のパイロット噴射によるアンモニアの燃焼効率改善により、排ガス中のアンモニアは、NOx と 同程度の排出量まで低減できるため、未燃アンモニアの低減は、脱硝触媒において NOx と反応さ せることにより、十分達成できることを確認した。アンモニア燃焼効率 98%時、触媒による後処理 によりアンモニア排出濃度を 10ppm 程度まで浄化できることを確認した。
- (8) アンモニア燃料船に係わる既存規則を調査した結果下記の知見を得た。
  - ・アンモニアは、IMDG コードにおいて引火点が 60℃以上の引火性がない毒性ガスとして扱われている。このことから、IGF コードの対象外であると考えられる。
  - ・アンモニア燃料船が、従来の油燃料船と同等以上の安全性が担保するためには、可燃性ガス及び毒性ガスであることを考慮する必要がある。
  - ・アンモニア燃料船の実現に向け、下記の SOLAS 条約に追加されるガイドラインを想定した場合の 検討項目案の例を整理した。
    - ✓ 暴露甲板から下の区画、密閉区画、人がいる区画におけるアンモニア燃料管は二重管
      > (メタノール燃料船のガイドラインを参考)
    - ✓ 換気方法(回数、検知器の仕様、換気装置の使用材料(Cu、 Zn 禁止)など)
      - ▶ (アンモニア運搬船の輸送規則(IGC コード)を参考)
    - ✓ 蒸気の滞留や拡散を考慮した換気装置の設置位置を最適化する解析手法
    - ✓ 漏洩時の防護方法(防護服の設置、避難区画など)
      - ▶ (IGC コードを参考)

3-11. 今後の課題

アンモニアは燃焼性を持っているが、その反応性は、ディーゼル機関で従来用いられている炭化水素 燃料と比較して低い。燃料として利用する場合、反応性の改善とアンモニアの燃焼により生成される温 室効果ガスである N<sub>2</sub>O の生成抑制が課題となると考えられる。本研究では、軽油のパイロット噴射に よるアンモニアの燃焼効率の改善が達成され、その効果は、アンモニアと軽油の燃焼過程での相互作用 によるものと示唆された。しかし、その詳細なメカニズムは不明である。

今後、ディーゼル機関において、アンモニアと軽油を混焼させる場合、N<sub>2</sub>Oの生成を抑制しながらア ンモニアの反応性を改善する効果的な燃焼制御方法の開発が必要である。その開発には、アンモニアと 軽油の相互作用の詳細を明らかにする必要がある。

4. 外部発表実績

(1)論文発表 <査読付き> 0件

該当なし

<査読なし(総説等含む) > 0件

(2)学会、展示会等発表<招待講演> 国内0件、海外0件

<口頭発表> 国内0件、海外1件

1) Yoichi Niki, Yoshifuru Nitta, Hidenori Sekiguchi, Koichi Hirata, EMISSION AND COMBUSTION CHARACTERISTICS OF DIESEL ENGINE FUMIGATED WITH AMMONIA The American Society of Mechanical Engineers, Internal Combustion Fall Technical Conference, 米国、2018年11月4日.

<ポスター発表> 国内2件、海外0件

- 仁木洋一、新田好古、平田宏一、春海一佳、水素エネルギーキャリアの船舶輸送及び利用に関する検討、日本機械学会第26回交通・物流部門大会、2017年12月4日.
- 2) 仁木洋一、新田好古、春海一佳、平田宏一、西尾澄人、関ロ秀紀、市川泰久、アンモニア混焼エ ンジン、第18回海上技術安全研究所研究発表会、2018年7月18日.

<展示会、ワークショップ、シンポジウム等> 国内0件、海外0件

(3) プレス発表該当無し

該ヨ無し

- (4)マスメディア等取材による公表 該当無し
- 5. 特許出願実績 該当無し
- 6. 参考文献
- 1) 仁木洋一、西尾澄人、新田好古、市川泰久、関ロ秀紀、平田宏一、アンモニアを用いたディーゼ ル機関の混焼運転、第86回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集、pp.147-148.2016
- 2) 西尾ら、日マリ学会誌、Vol.47, No.1, 65-70, 2012.
- 3) スーパークリーンマリンディーゼルの研究開発成果報告書,社団法人日本舶用工業会,2012.