



2022年度

水素・アンモニア燃料用

小型ガス燃焼ユニット（GCU）の技術開発

成果報告書

2023年4月

一般社団法人 日本船用工業会

はしがき

本報告書は、BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて、2022年度の1年計画で、一般社団法人日本船用工業会が株式会社ボルカノに委託して実施した、「水素・アンモニア燃料用小型ガス燃焼ユニット（GCU）の技術開発」の成果をとりまとめたものである。

ここに、貴重な開発資金を助成いただいた日本財団、並びに関係者の皆様に厚く御礼申し上げる次第である。

2023年4月
(一社)日本船用工業会

目 次

1. 事業の目的	1
2. 事業の目標	4
3. 2022年度の実施内容	5
3.1 アンモニア燃料用 GCU の技術開発	5
3.1.1 アンモニア燃料用 GCU の設計	5
3.1.2 アンモニア燃料用 GCU 試作および評価試験	14
(1) 設計図面および仕様に基づいたアンモニア燃料用 GCU および構成部品の試作	14
(2) 評価試験準備	17
(3) 排ガス分析計の選定	22
(4) 試作したアンモニア燃料用 GCU を用いての構成部品仕様の最適化	24
(5) 最適仕様のアンモニア燃料用 GCU 試作に対する評価試験結果	26
3.2 水素燃料用 GCU の技術開発	29
3.2.1 水素燃料用 GCU の設計	29
3.2.2 水素燃料用 GCU 試作および評価試験	33
(1) 設計図面および仕様に基づいた水素燃料用 GCU および構成部品の試作	33
(2) 評価試験準備	36
(3) 排ガス分析計の選定	37
(4) 試作した水素燃料用 GCU を用いての構成部品仕様の最適化	38
(5) 最適仕様の水素燃料用 GCU 試作に対する評価試験結果	39
4. 目標の達成状況	42
4.1 アンモニア燃料用 GCU の技術開発	42
4.2 水素燃料用 GCU の技術開発	42
5. 2022年度の実施内容の概要	43
6. 今後の予定	45
7. まとめ	48

1. 事業の目的

世界で脱炭素の動きが加速している。日本財団様の「ゼロエミッション船シンポジウム」(2021年5月18日開催)において、ゼロエミッション船(内航船)のロードマップが示された。

また「日本郵船株式会社、株式会社 IHI 原動機、一般財団法人日本海事協会の3社は、世界初アンモニア燃料タグボートの実用化に向け共同研究開発契約を締結」とのプレス発表を受け、アンモニア燃料用ガス燃焼ユニット(以下 GCU)の商品化が求められている。水素燃料船向けの水素燃料用 GCU も同様である。

弊社はこれまでに LNG 燃料用小型 GCU を開発した。これらの技術は GHG 削減対策として新燃料を用いた新規「水素・アンモニア燃料用 GCU」などに対するブリッジング・テクノロジーと位置づけられるが、各燃料の特性上、実用化に向けて解決しなければならない問題が多く、上記情勢に向けていち早く取り組む必要がある。

本事業の目的は以上の通りであるが、個別の事項について補足すると次の通りである。

① 意義・必要性(社会的背景)

パリ協定を機に各国がカーボンニュートラル目標を設定している。日本でも2020年10月に菅総理は「2050年カーボンニュートラル」を宣言した。またそのマイルストーンとして2030年に46%削減(2013年比)が追加設定された。IMOでも「2050年50%以上削減(2008年比)」という目標から、ゼロ化を目指す方向に転換されている。このように、世界でカーボンニュートラルの動きが加速されている。

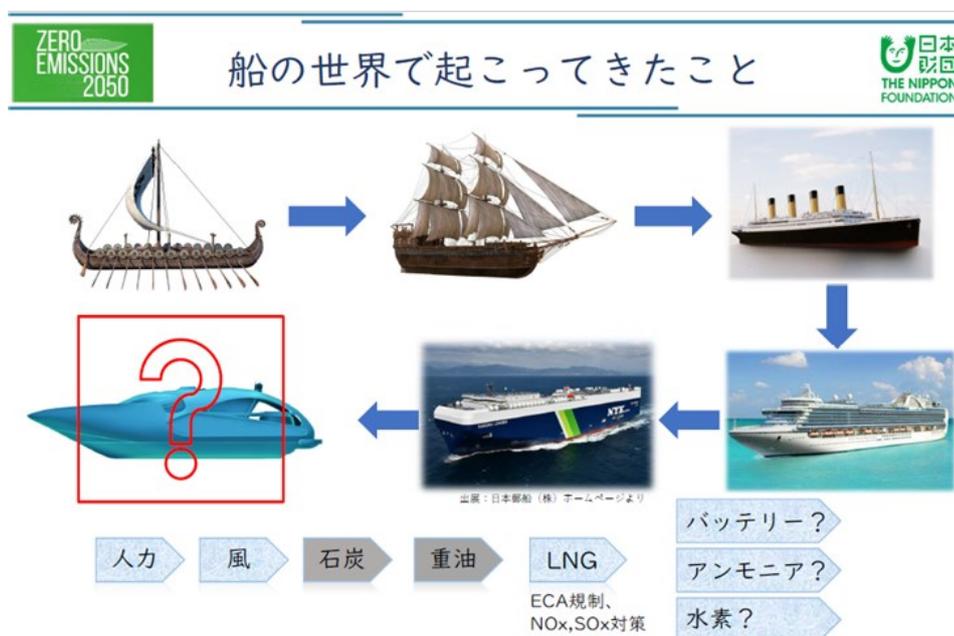


図1 船の世界で起こってきたこと ※出典「ゼロエミッション船時代がやってくる」
／日本財団 常務理事 海野光行 氏

2021年5月18日 日本財団様主催「ゼロエミッション船シンポジウム」

このような情勢を踏まえ、日本財団様の「ゼロエミッション船シンポジウム・カーボンニュートラル時代に向けた国内海上輸送のあり方」(2021年5月18日)においては、水素燃料船、アンモニア燃料船などが今後普及していくことが示された。※図1を参照のこと。

また2021年5月24日に国交省海事局 海洋・環境政策課より発表された「次世代船舶の開発」プロジェクトの研究開発・社会実装計画(案)では、「2030年までに水素燃料船の実証運航を完了」、「アンモニア燃料船においては、2028年までのできるだけ早期に商業運航を実現」という具体的開発ロードマップ案を掲げられている。

既に船用ディーゼルエンジンのシェア No.1 の MAN 社は「2024年にアンモニアディーゼルエンジン開発を完了する。」と発表している。また国内船用向けエンジンメーカー各社も水素・アンモニアエンジンの開発に向けて動き始めている。

更に国内では「日本郵船株式会社、株式会社 IHI 原動機、一般財団法人日本海事協会の3社は、世界初のアンモニア燃料タグボートの実用化に向け、共同研究開発契約を締結する。」とプレス発表された。

ここでアンモニア燃料用ガス燃焼ユニット(Gas Combustion Unit: 以下GCU)の機能について触れておく。燃料タンク内に充填されているアンモニアは液体の状態であるが、タンクへの侵入熱や船の動揺により蒸発ガス(BOG=Boil Off Gas)が発生しタンク圧力が上昇する。ガスの大気放出によるタンク圧力制御は、緊急事態を除いて認められていない。タンク圧力調整方法として「(2)蒸発ガスの燃焼」が謳われている(IGFコード、日本海事協会発行代替燃料船ガイドライン(第2.0版))。よって、アンモニア燃料用GCUの商品化が求められる。また並行して開発が進んでいる水素燃料船向けの水素燃料用GCUについても同様である。GCUはガスを燃焼処理するためのバーナと、その燃焼を行うための空間を有した炉体から構成されている。

このGCUのその他の使用目的としては、不活性ガス(N₂)混じりの廃ガスを焼却処理することである。この燃焼処理においては次の場面がある。

- ・入渠(船体の点検や修理)後に、タンク内のN₂をアンモニアガスに置換するガッシングアップ時のタンクから排出されるN₂とアンモニアガスの混合廃ガスは、大気に放出することができないため、その際にGCUで燃焼処理する。
- ・また入渠前にガスフリー(タンク内アンモニアガスをN₂に置換)を行うが、その際にタンクから排出されるアンモニアガスとN₂の混合廃ガスは大気に放出することができない。その処理の際にもGCUを使用する。
- ・バンカリング(燃料供給)終了時のホースおよび配管内の残液・残ガスをN₂パーズするが、そのパーズガスをGCUで処理する。

よって、ガス処理できる装置が必要になるため、アンモニアエンジンや水素エンジンだけ開発されても、GCUが無ければ船舶として成り立たない。

② 課題

アンモニア燃料用 GCU においては、難燃性のアンモニア（臭気・毒性）が燃焼せずにそのまま排出されるアンモニアスリップの発生や、不完全燃焼による亜酸化窒素 N₂O（温暖化係数が二酸化炭素 CO₂の約 300 倍）の排出を抑制することである。

水素燃料用 GCU においては、水素は燃焼速度が速く、燃焼コントロール技術を確立することが課題である。

③ 効果

これらの課題を解決するために、アンモニア燃料用 GCU の開発では、アンモニアのスリップ、N₂O 排出の低減（後処理を含む）を目指す。

水素燃料用 GCU の開発では、燃焼速度の大きな水素火炎の保炎性能のコントロールを目指す。

いずれの燃料においても、LNG 燃料用 GCU の開発および弊社の保有する LNG 運搬船および LNG 燃料船搭載ボイラ用バーナで培ってきたガス・油混焼技術を基礎として、アンモニア・水素燃料に適した GCU を開発する。この結果、上記意義・必要性に対し、可能な限り早い時期に当該製品を提供し、カーボンニュートラル実現に向けて、速やかに貢献したいと考える。

④ 新規性

前述のように弊社は、2015 年 8 月に竣工した国内初の LNG 燃料タグボート“魁(さきがけ)”（船主：日本郵船様）に、LNG 燃料用小型 GCU の初号機を搭載していただき、翌年 2016 年 3 月に一般発売を開始し、2019 年 2 月には竣工した LNG 燃料タグボート“いしん”（船主：商船三井様）にも LNG 燃料用小型 GCU を搭載していただいた。

しかしながら現在、アンモニア燃料用 GCU は、商品としては世の中に未だない。また、水素燃料用 GCU については、海外製はあるが国内製で製品化された GCU は無く、特に、前述のタグボートに搭載できるような小型 GCU は国内・海外ともに商品化されていない。いずれの燃料においても、燃焼技術的ハードルは高いが、LNG 燃料用小型 GCU 等で確立してきたガス・油混焼技術が、この新燃料への橋渡しをしてくれるものと考えている。

2. 事業の目標

(1) アンモニア燃料用 GCU 試作品

目標値：煙突出口排気ガス中において、NK 船級基準に設けられている人体への影響を考慮したアンモニア濃度 $\leq 25\text{ppm}$ を満足すること。

(2) 水素燃料用 GCU 試作品

目標値：煙突出口排気ガス中において、水素の排出濃度は 0ppm のこと。

3. 2022年度の実施内容

3.1 アンモニア燃料用 GCU の技術開発

3.1.1 アンモニア燃料用 GCU の設計

表1にメタン・水素・アンモニアの燃料特性・燃焼特性を示す通り、アンモニア燃料は極めて燃焼速度が遅く（7cm/sec）、非常に燃やしにくい燃料である。一方、水素燃料は燃焼速度が速く（270～290cm/sec）、燃やしやすいが、逆火等がないように安全性に留意する必要がある。

自社においてこれまで使用実績が多いメタン燃料の燃焼速度（37～38cm/sec）は平均的であり、取扱い易い。

表1 メタン・水素・アンモニアの燃料特性・燃焼特性の比較

	単位	メタン(CH ₄)	水素(H ₂)	アンモニア(NH ₃)
分子量	(g/mol)	16.0	2.0	17.0
低位発熱量	MJ/kg	50.1	122	18.8
	MJ/Nm ³ (0°C、1atm)	35.8	10.7	24.4
最大燃焼速度	cm/sec	37~38	270~290	7
最小点火エネルギー	mJ	0.29	0.015	170
着火温度	K	900~920	800~850	924
可燃範囲 (当量比)	%	5~15 (0.5~1.7)	4~75 (0.4~7.5)	16~25

以上より、各燃料の特性が大きく異なるため、計画段階ではアンモニア燃料用 GCU と水素燃料用 GCU を下記①予混合燃焼（アンモニア）と②拡散燃焼（水素）に分けて設計する計画を立てていた。

- ① 予混合燃焼（アンモニア）：予め燃料と空気を混ぜてから燃やす設計で『燃やしやすい⇒逆火しやすい』の特徴を有している。
- ② 拡散燃焼（水素）：燃料と空気を別々に供給して燃やす設計で『燃やしにくい⇒逆火しにくい』の特徴がある。

ここで、図2に①予混合燃焼と②拡散燃焼の設計比較のイメージを示す。

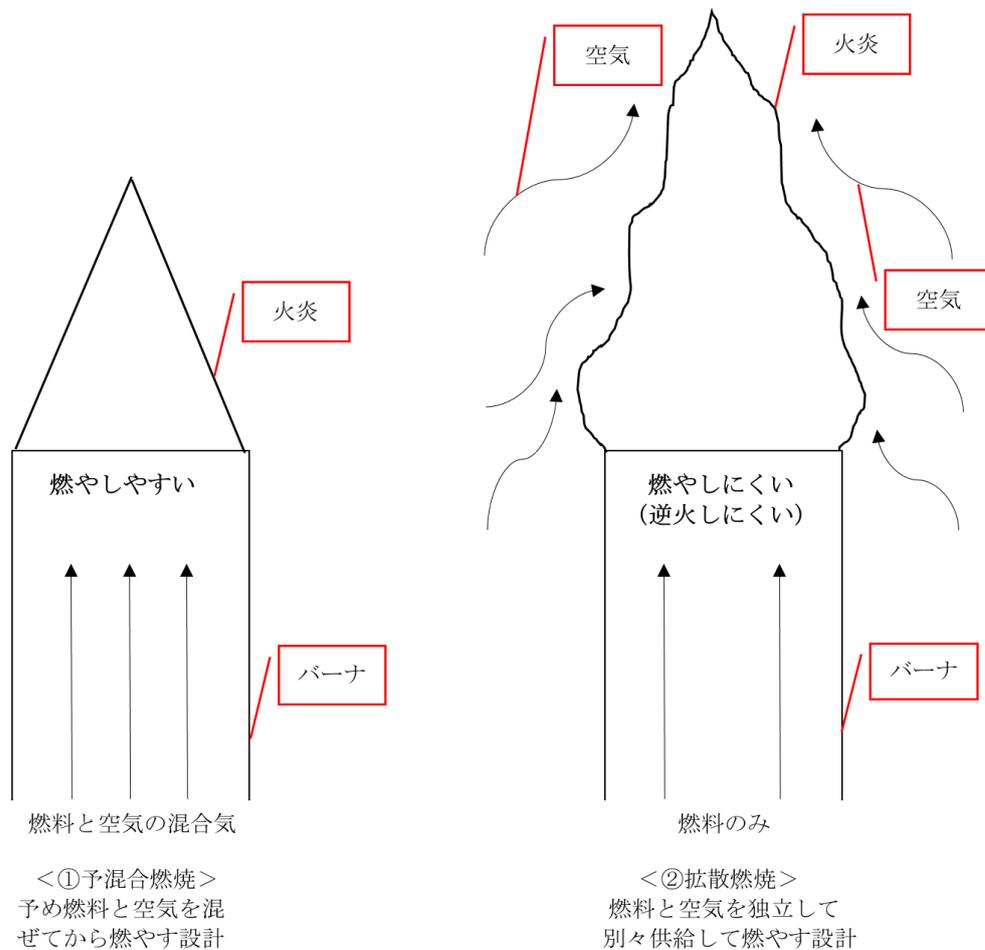


図2 ①予混合燃焼と②拡散燃焼の設計比較のイメージ

よって、アンモニアにおいては、②拡散燃焼の「燃料と空気を別々に供給して燃やす設計」での目標のクリアは難しいと考えていた。

しかしながら、逆火しにくい②拡散燃焼について、様々な議論を重ねた結果、バーナ構造に属するスロート（焚口）（※後ほど図3に示す）に対して、火炎が冷やされにくい断熱材構造の検討を加えることや、炉内温度を上げるためのパイロットバーナ（助燃バーナ）の本数を追加（油量を多くするような調整）することにより、燃えやすくする技術（逆火との両立）が開発できる可能性を見出した。

そこで商品化に向けて、最初に②拡散燃焼の設計を行い、燃えにくいアンモニア燃料を燃やしてみることにした。なお、②拡散燃焼の設計での結果が思わしくない場合には、①予混合燃焼の設計に戻すことにした。既に述べてきた現行LNG燃料用GCUも、同じ②拡散燃焼の設計となっている。

もしアンモニアと水素の燃やし方が同じ拡散燃焼になれば、その副産物として、部品の共通化を図ることができる。部品の種類を削減し、汎用性の高い共通部品を各燃料用に使用することで、調達コストのみでなく製造や管理コストを含めたトータルコスト低減になる。更に共通部品を使う頻度が増えるため、その部品が洗練され品質向上にもつながる。

ここで、拡散燃焼設計での具体的なバーナ構造を図3に示す。バーナはスワラ（保炎器）、パイロット筒（パイロットバーナ）、ガスノズル（ガス燃焼処理）およびスロート（焚口）より構成されている。

燃焼処理対象のアンモニアはガスノズルより供給される。パイロット筒に収まっているパイロットバーナの点火および助燃機能により、アンモニアは燃焼処理されながら、スロートより、炉内（燃焼室）へと導かれ、燃焼が完了して、最終的には排ガス出口より放出される。

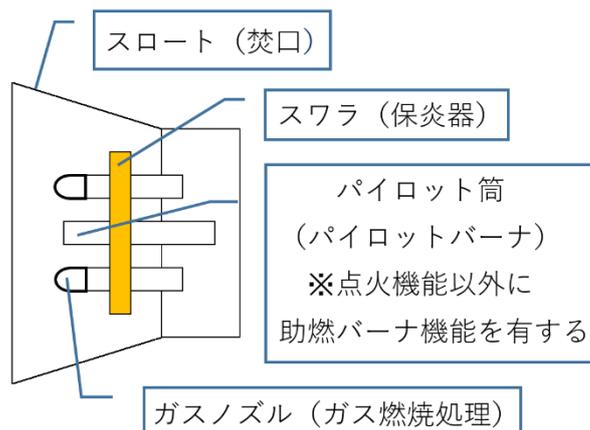


図3 バーナ構造（拡散燃焼）

またバーナの中央に位置するスワラの機能は、図4に示すように燃焼ガス流れをスワラの中心に戻す再循環領域を作り、火炎を安定・維持させる保炎器の役割を果たすことである。

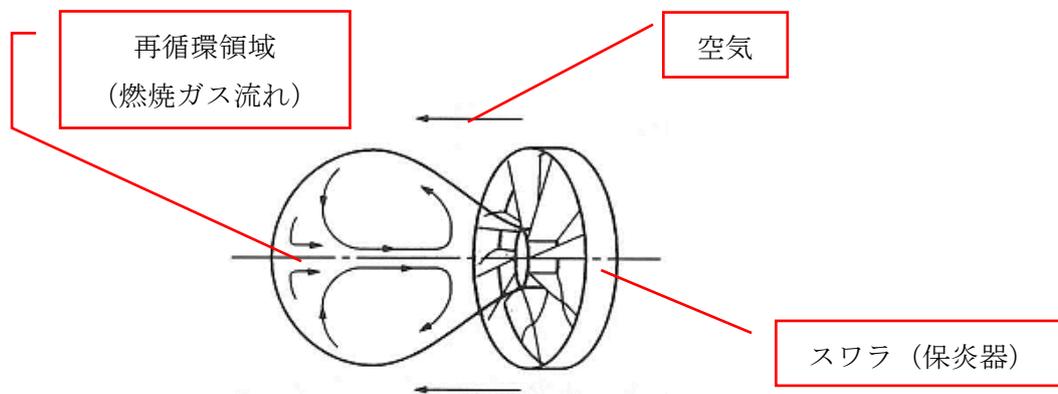


図4 スワラの機能

また今回、船種としてはタグボートおよびバルクキャリアへの搭載を想定している。よって、求められている燃焼処理量は、既存製品 LNG 燃料用 GCU である「型式：MECS-G25」の燃焼処理量（メタン 25kg/h：350kW 相当）となる。しかしながら、本評価試験を行う自社のアンモニア供給設備の能力限界より、アンモニア燃焼処理量の最大は 60kg/h（309kW 相当）となる。求められる燃焼処理量の 88%相当（309kW/350kW×100）となってしまうが、70kg/h（350kW 相当→68kg/h となるが、設計値は 70kg/h→360kW 相当へ丸めている）まで想定したバーナ設計にしているため、60kg/h までの評価ができれば、技術的目途が立つと判断した。またアンモニア燃焼処理量の最小は 10kg/h（52kW）までとして、確認を行うこととした。

表2に燃料流量・燃焼処理量と熱量との関係性（換算表）を示す。また、ここで混焼率の定義を示す。パイロットバーナ（助燃バーナ）で軽油 4.1L/h（50kW 相当）を燃やして、アンモニアを 9.7L/h（50kW 相当）を燃焼処理した場合のアンモニア混焼率は次の算出式とした。ここでは、熱量ベースで混焼率を求めることとした。 ※表2の黄色マーキング数値を参照のこと。

$$\square \text{アンモニア混焼率} = (\text{アンモニア燃焼処理量：50kW 相当}) / (\text{助燃バーナ燃焼量：50kW 相当} + \text{アンモニア燃焼処理量：50kW}) \times 100 = 50\text{kW} / (50\text{kW} + 50\text{kW}) \times 100 = 50\%$$

表2 燃料流量・燃焼処理量と熱量との関係性（換算表）

熱量換算		燃料流量・燃焼処理量 (kg/h)					
		A重油	軽油 (MGO)	メタン	メタン	アンモニア	水素
50	kW	4.2	4.1	9.0	3.6	9.7	1.5
100	kW	8.4	8.3	18.1	7.2	19.4	3.0
200	kW	16.9	16.6	36.2	14.3	38.7	6.0
300	kW	25.3	24.9	54.3	21.5	58.1	9.0
500	kW	42.2	41.5	90.5	35.9	96.8	15.0

*また表3に、パイロットバーナのノズル・本数の違いによる燃料流量、熱量およびアンモニア燃焼処理量に対するアンモニア混焼率比較の具体例を示す。

表3 パイロットバーナのノズル・本数の違いによる燃料流量、熱量
およびアンモニア燃焼処理量に対するアンモニア混焼率比較の具体例

パイロットバーナ：軽油 (MGO) アンモニア：燃焼処理量／混焼率	1本流量および熱量			2本流量および熱量			3本流量および熱量		
	(L/h)	(kg/h)	(kW)	(L/h)	(kg/h)	(kW)	(L/h)	(kg/h)	(kW)
0.75ガロン	3.4	2.7	32.8	6.8	5.4	65.5	10.2	8.2	98.3
最大：60kg/h	-	-	90%	-	-	83%	-	-	76%
最小：10kg/h	-	-	61%	-	-	44%	-	-	35%
1.2ガロン	5.2	4.2	50.1	10.4	8.3	100.2	15.6	12.5	150.4
最大：60kg/h	-	-	86%	-	-	76%	-	-	67%
最小：10kg/h	-	-	51%	-	-	34%	-	-	26%
1.5ガロン	6.8	5.4	65.5	13.6	10.9	131.1	20.4	16.3	196.6
最大：60kg/h	-	-	83%	-	-	70%	-	-	61%
最小：10kg/h	-	-	44%	-	-	28%	-	-	21%
2.5ガロン	11.2	9.0	108.0	22.4	17.9	215.9	33.6	26.9	323.9
最大：60kg/h	-	-	74%	-	-	59%	-	-	49%
最小：10kg/h	-	-	33%	-	-	19%	-	-	14%

本試験で計画しているアンモニア燃焼処理量最大の 60kg/h (309kW 相当) を助燃バーナであるパイロットバーナ 1.5 ガロンノズル 1 本 (65.5kW 相当) で燃焼処理 (目標：煙突出口排気ガス中において、アンモニア濃度 ≤25ppm を満足する) した場合のアンモニア混焼率は、下記の結果となる。※表3黄色マーキングの各数値を参照のこと。

$$\square \text{アンモニア混焼率} : 309\text{kW} / (65.6\text{kW} + 309\text{kW}) \times 100 = 83\%$$

更に本試験で計画しているアンモニア燃焼処理量最小の 10kg/h (52kW 相当) を助燃バーナであるパイロットバーナ 1.5 ガロンノズル 3 本 (196.6kW 相当) で燃焼処理 (目標：煙突出口排気ガス中において、アンモニア濃度 ≤25ppm を満足する) した場合の結果は次の通りとなる。

$$\square \text{アンモニア混焼率} : 52\text{kW} / (196.6\text{kW} + 52\text{kW}) \times 100 = 21\%$$

アンモニアを燃焼処理するためのパイロットバーナの燃料は、従来の軽油（MGO）を用いており、軽油代替のバイオ燃料やE-fuel（合成燃料）のようなカーボンニュートラル燃料ではない。CO₂削減のためには、パイロットバーナの燃料である軽油（MGO）使用量を抑える必要がある。ランニングコスト低減にもつながるため、パイロットバーナ燃料量を減らす検討も加えた。

また船上においては、限られたスペースのため、各機器の面積・体積が重要となる。よって、既存のGCUサイズに収めること（コンパクト化）が望まれる。従って、表4に示す現行LNG燃料用GCU「型式：MECS-G25」サイズを目指すこととした。

表4 LNG燃料用GCU（型式：MECS-G25）サイズ

寸法	L (Length)	mm	2,530
	W (Width)	mm	962
	H (Hight)	mm	2,015

図5にアンモニア燃料用GCU試作設計の外観を示す。次に示す流れで、本開発事業を進めるため、下記②を考慮して、改造・部品入れ替えやすい試作設計とした。

- ① 本試作設計通り、アンモニア燃料用GCU試作品を完成させる。
- ② アンモニアが適正に燃焼処理できるように、各検討項目について試験を繰り返しながら、最適な形状や配置（最適化⇒最適仕様）を決定する。
- ③ 最適仕様の試作品にて評価試験を行う。

炉体は側面、フロントプレート、炉尻等で構成されている。図3、4で説明したバーナは、炉体のフロントプレートの中央に位置する。パイロットバーナおよびアンモニア燃焼処理には燃焼用ファンを用いて燃焼空気を供給した。炉内にてアンモニア燃焼処理が行われ、燃焼排ガスは冷却用ファンにて所定の温度に空冷され、排ガス出口から煙道に導かれ大気へ放出される。

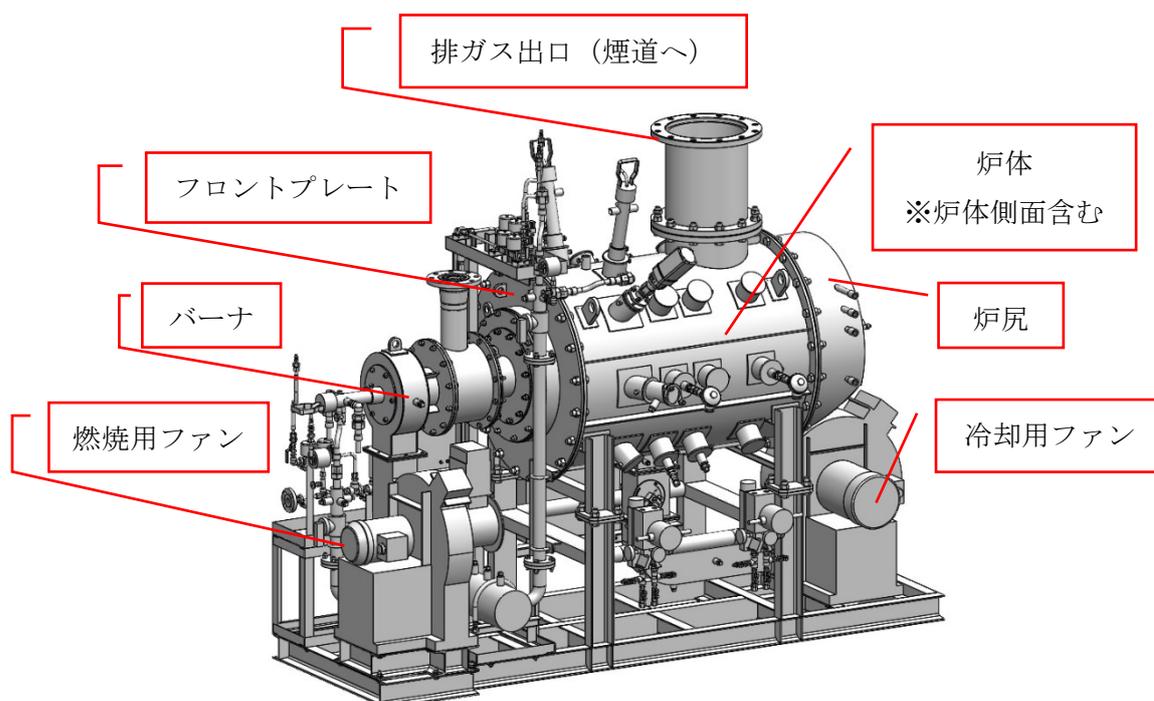


図5 アンモニア燃料用GCU試作設計の外観

更に各設計パラメータの最適化も含み、次の検討項目を確認し、最適仕様が見出せるように、各試作部品をそれぞれ設計した。

後ほど述べる「バーナにおけるアンモニア燃焼処理用ガスノズルの検討」、「アンモニア燃焼処理用炉体の検討」、「燃焼空気ファンの検討」、「炉体冷却用ファンの検討」等々の設計検討をそれぞれ加え、アンモニア燃料用 GCU に必要な構成要素部品を積み上げた結果、図 6 に示す通り、アンモニア燃料用 GCU 試作品を「L2, 530×W962×H2, 015(mm)」という大きさに収めることができ、現行 LNG 燃料用 GCU と同等の大きさになることが確認できた。

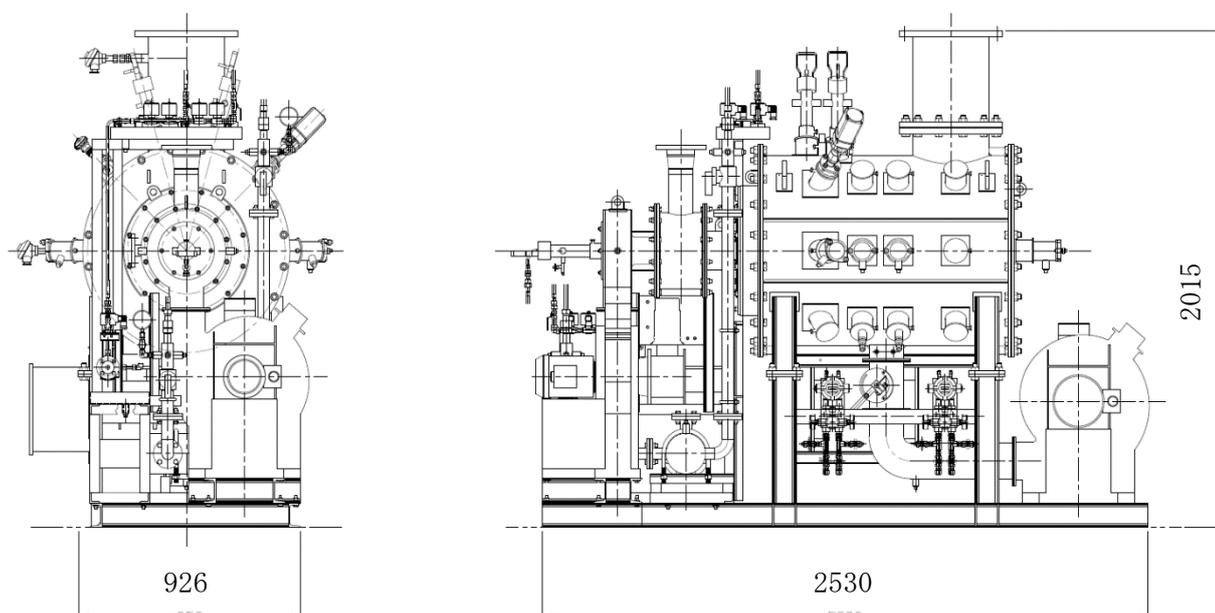


図 6 アンモニア燃料用 GCU 試作品の L、W、H 寸法

また図7に示す通り、アンモニア燃料用GCUと水素燃料用GCUとの共通制御盤を設計した。
具体的には、油燃料を用いたパイロットバーナおよびアンモニア燃焼処理の各燃焼量および燃焼空気を供給する燃焼用ファン、排ガス温度を下げる冷却ファンを、それぞれコントロールするための制御盤として設計した。



図7 制御盤設計図 (GCU 共通)

ここでは目標値「煙突出口排気ガス中において、アンモニア濃度 $\leq 25\text{ppm}$ を満足すること」をクリアすることを目的として、アンモニアを燃やしやすくするため、各設計パラメータの最適化も含め、次の検討項目を確認して、最適仕様を見出せるように、各試作部品を設計した。

- ① ガスノズル仕様・・・図8に示す通り、アンモニア燃焼処理用のガスノズル仕様を決めるための試作部品について、3種類を設計した。

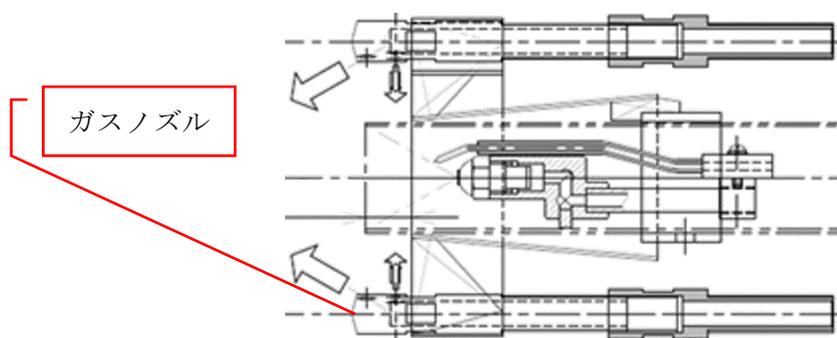


図8 ガスノズル仕様

- ② スワラに対するパイロット筒・ガスノズル・スロート相対位置・・・図9に示す寸法L1、L2およびL3を調整できるように試作部品を設計した。

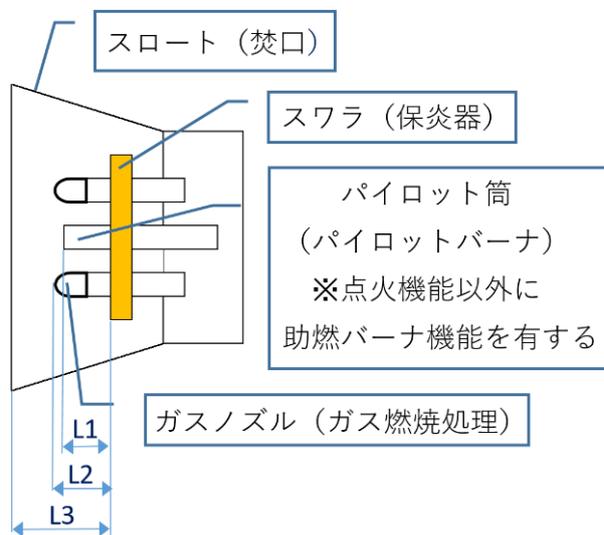


図9 スワラに対するパイロット筒・ガスノズル・スロート相対位置

- ③ パイロットバーナ仕様・・・図10に示すように、パイロットバーナのノズル流量、本数、位置等について検討できるように試作部品を設計した。

ここで、パイロットバーナ1は点火およびアンモニア燃焼処理のための助燃バーナ機能を有している。パイロットバーナ2、3はアンモニア燃焼処理のための専用の助燃バーナである。

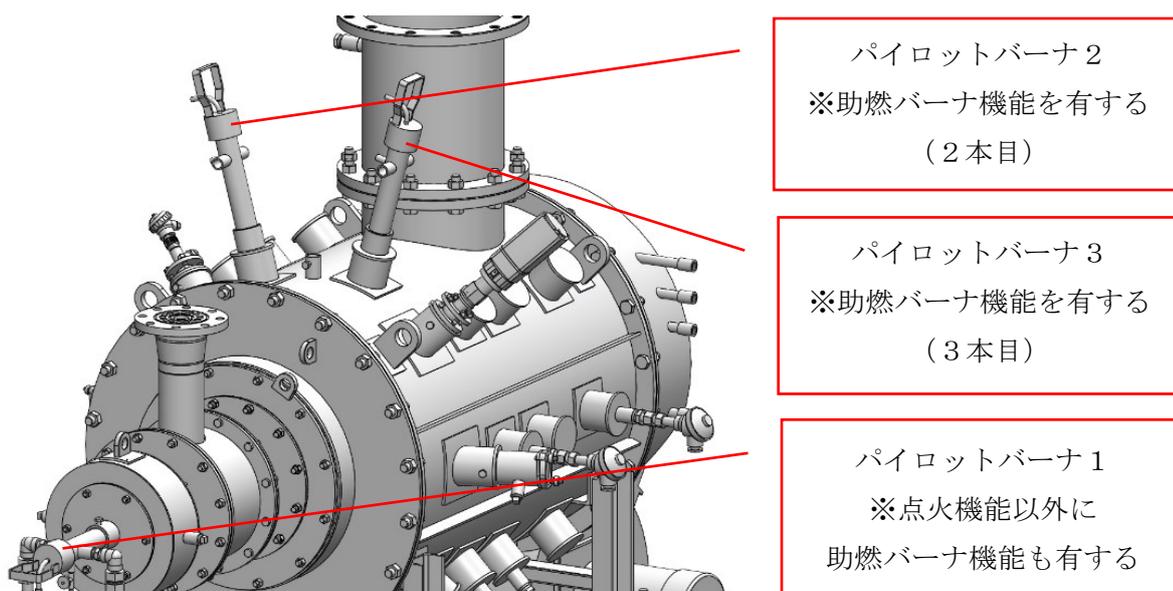


図10 パイロットバーナ1～3

- ④ スロート・・・入れ替え可能な複数の円筒ブロック化設計をした。図1 1に示すように、形状や大きさを変えた断熱材構造のスロート1～3の試作部品を設計した。

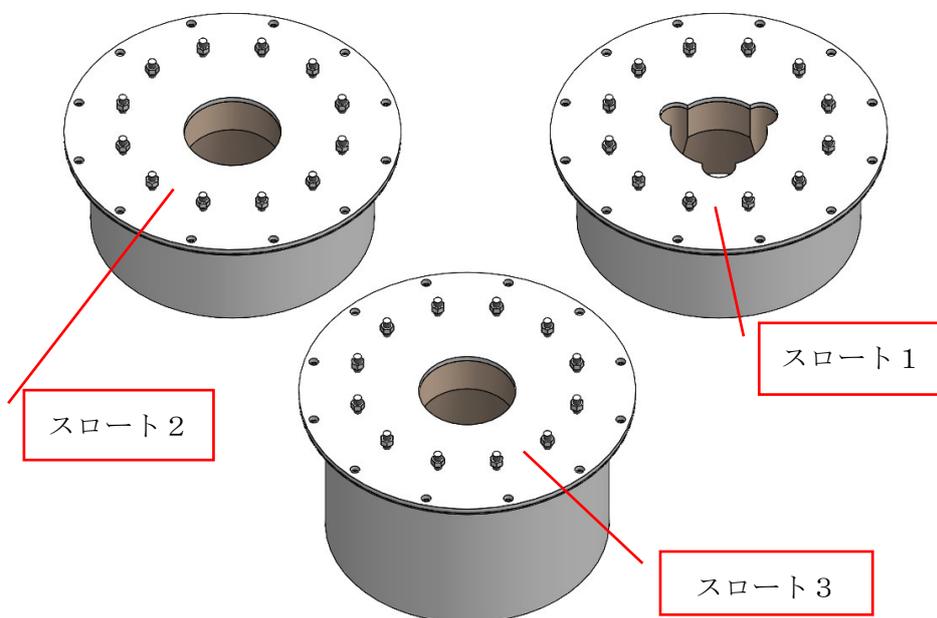


図1 1 バーナスロート1～3

- ⑤ 炉体構造・・・図1 2に示す通り、火炎観察ができる複数の覗き窓を設置し、火炎検知のためのフレームアイや複数のパイロットバーナ（助燃バーナ）を炉体に設けることができるように試作炉体（1台）を設計した。

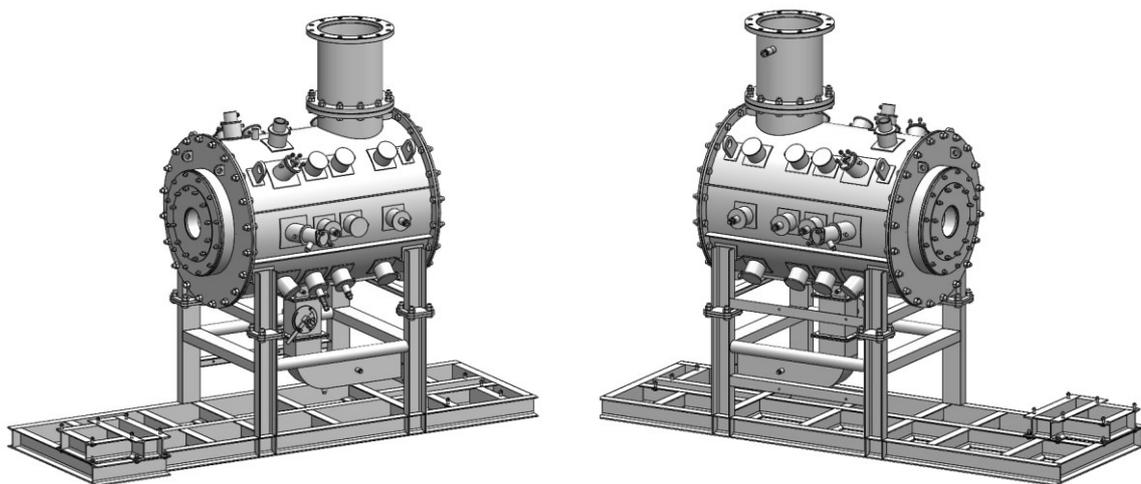


図1 2 炉体構造

3.1.2 アンモニア燃料用 GCU 試作および評価試験

(1) 設計図面および仕様に基づいたアンモニア燃料用 GCU および構成部品の試作

ここでは、設計図面に基づき準備したアンモニア燃料用 GCU および構成部品の試作について述べる。

写真 1 に試作品を示すが、アンモニアを燃焼処理するためのバーナは、燃焼室を有する炉体の前面に設けたフロントプレートに固定して設置した。

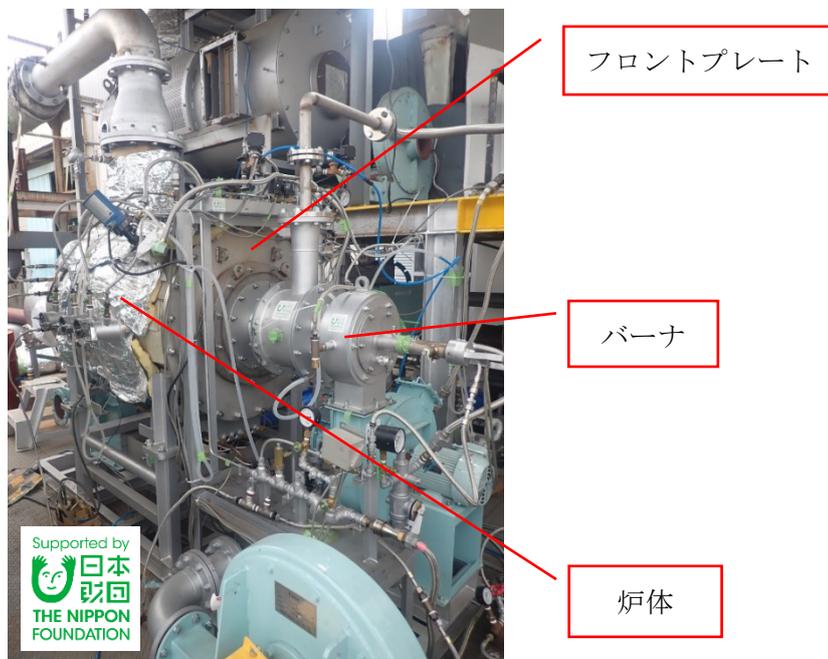


写真 1 バーナおよび炉体

写真 2 に示す通り、設計図面に基づき炉体の下流側に位置する炉尻および炉体の側面には、それぞれ覗き窓を設けて、目視で火炎や燃焼状態の観察を行えるような試作品となっている。

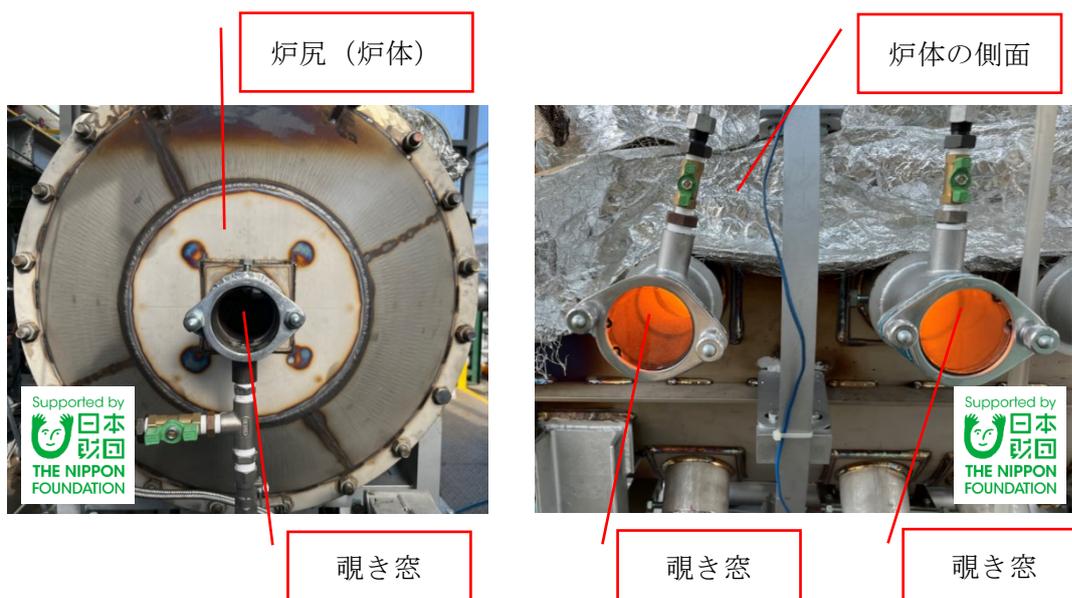


写真 2 覗き窓 (火炎観察)

目標値である「煙突出口排気ガス中において、アンモニア濃度 $\leq 25\text{ppm}$ を満足すること」を確認するための煙道および排ガスサンプリング位置を写真3に示す。

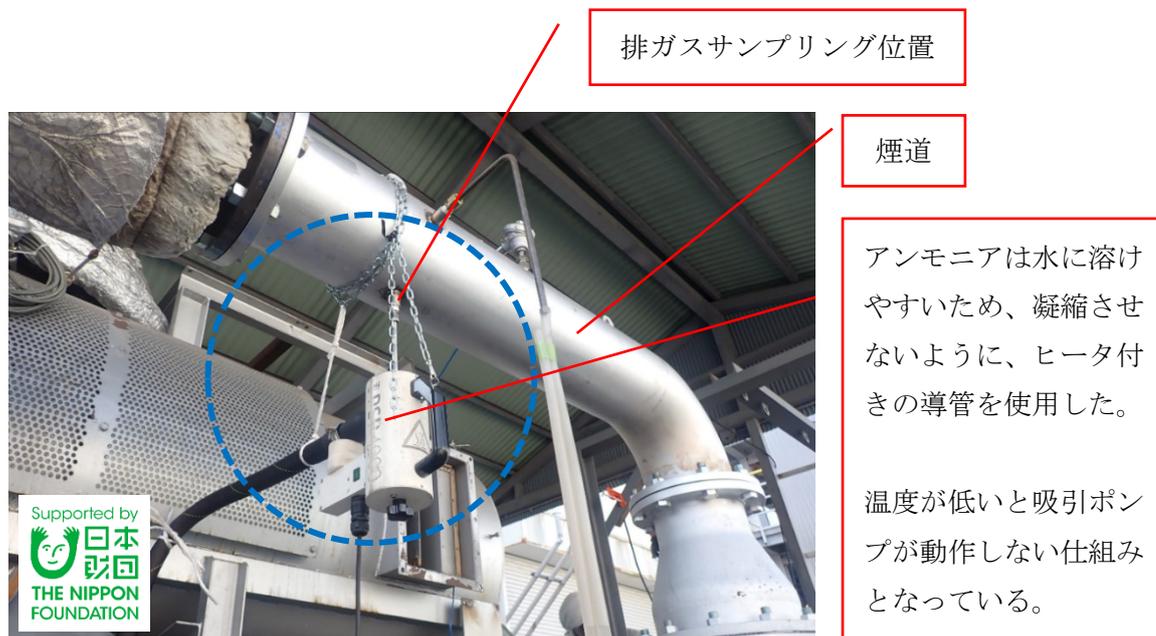


写真3 煙道および排ガスサンプリング位置

燃焼処理用のアンモニアガスをバーナに導く供給配管試作を写真4に示す。



写真4 燃焼処理用アンモニアガスをバーナに導く供給配管

また写真5に示す通り、前述の図7の設計図面にに基づき、アンモニア燃料用 GCU と水素燃料用 GCU との共通制御盤の試作品を用いて評価試験を実施した。

具体的には、油燃料を用いたパイロットバーナおよびアンモニア燃焼処理の燃焼量および空気を供給する燃焼用ファン、冷却ファンをそれぞれコントロールしながら、評価試験を行った。



写真5 制御盤 (GCU 共通)

(2) 評価試験準備

ここでは、評価試験に向けて準備してきた内容について述べる。

アンモニアは劇物である。日本産業衛生学会（2020年度）により、アンモニア許容濃度 = 25ppm と定められている。参考にアンモニア濃度と作用について表5に示す。

表5 アンモニア濃度と作用（人体への影響）

濃度 [ppm]	作用
5～10	明らかに臭気を感じる
25	不快感が起こる
200	刺激により呼吸が妨げられる
2500～4500	短時間(30分)で生命危険となる

このアンモニア許容濃度 25ppm が、今回の目標値である「煙突出口排気ガス中において、NK 船級基準に設けられている人体への影響を考慮したアンモニア濃度 \leq 25ppm を満足すること」の根拠になっている。

従って、本評価試験においても人体に影響が出ないように安全衛生上、写真6に示すアンモニアセンサおよび保護具を用いることとした。



写真6 アンモニアセンサおよび保護具

アンモニア燃料用 GCU 試作品の評価試験において、参考のため制御盤を操作している作業員を写真 7 へ示す。評価試験時には前述の写真 6 に示した保護具を用いた。



写真 7 制御盤を操作している作業員

評価試験を行う場合、表5に示す通り、工場その他の事業場の敷地の境界線の地表における規制基準（条例）を遵守する必要がある。表5の赤枠に示す通り、一般地域での規制基準は1ppmと定められている。

表5 工場その他の事業場の敷地の境界線の地表における規制基準

ア 工場その他の事業場の敷地の境界線の地表における規制基準

敷地の境界線の地表における規制基準は、特定悪臭物質22項目について定められており、順応地域については臭気強度3.5に対応する濃度、一般地域については臭気強度2.5に対応する濃度が基準値となっています。

物質名	順応地域	一般地域
アンモニア	5 ppm	1 ppm

またアンモニアの臭気強度別濃度についても表6に示す。アンモニア濃度が1ppmの場合、赤枠の通り、臭気強度は2.5となる。

表6 アンモニアにおける臭気強度別濃度 (ppm)

悪臭物質別臭気強度別濃度

(単位：ppm)

臭気強度	1	2	2.5	3.0	3.5	4	5
物質名							
アンモニア	0.1	0.6	1	2	5	10	40

- 臭気強度 1 : やっと感知できるにおい
 2 : 何のにおいであるかわかる弱いにおい
2.5 : 一般地域の規制基準
 3 : らくに感知できるにおい
 3.5 : 順応地域の規制基準
 4 : 強いにおい
 5 : 強烈なにおい

表 5 の規制基準を守るため、図 1 3 に示すようにアンモニア燃料用 GCU 試作品の排気出口に除害設備を設けた。

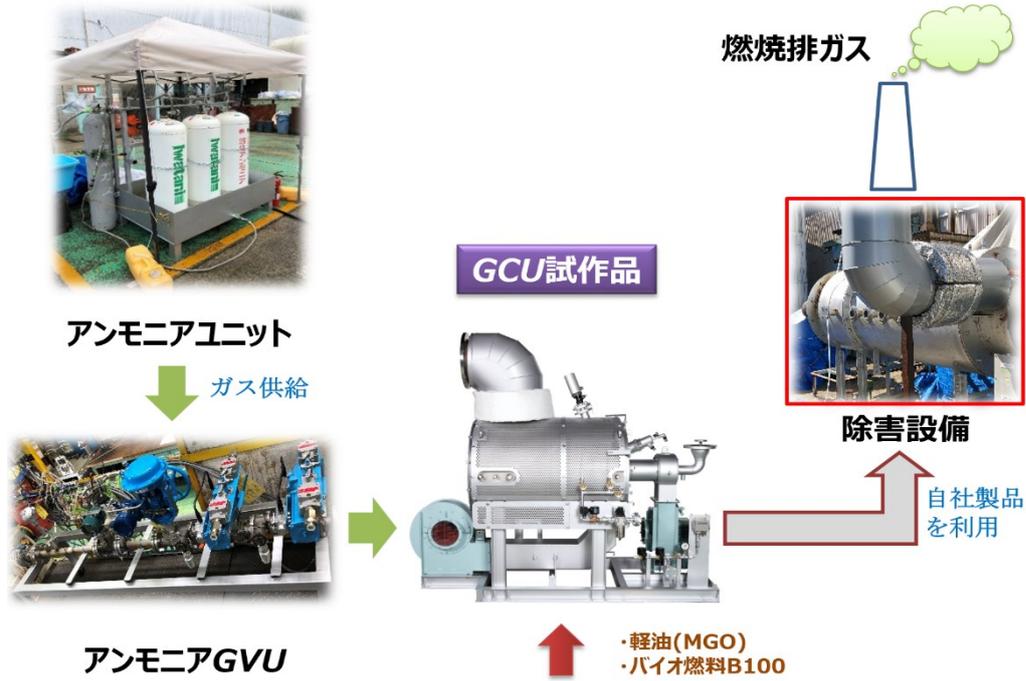


図 1 3 アンモニア燃料用 GCU 試作品の排気出口に設置した除害設備

また参考に、アンモニア燃料用 GCU 試作品の評価を行う試験場のレイアウトについて、図 1 4 に示す。

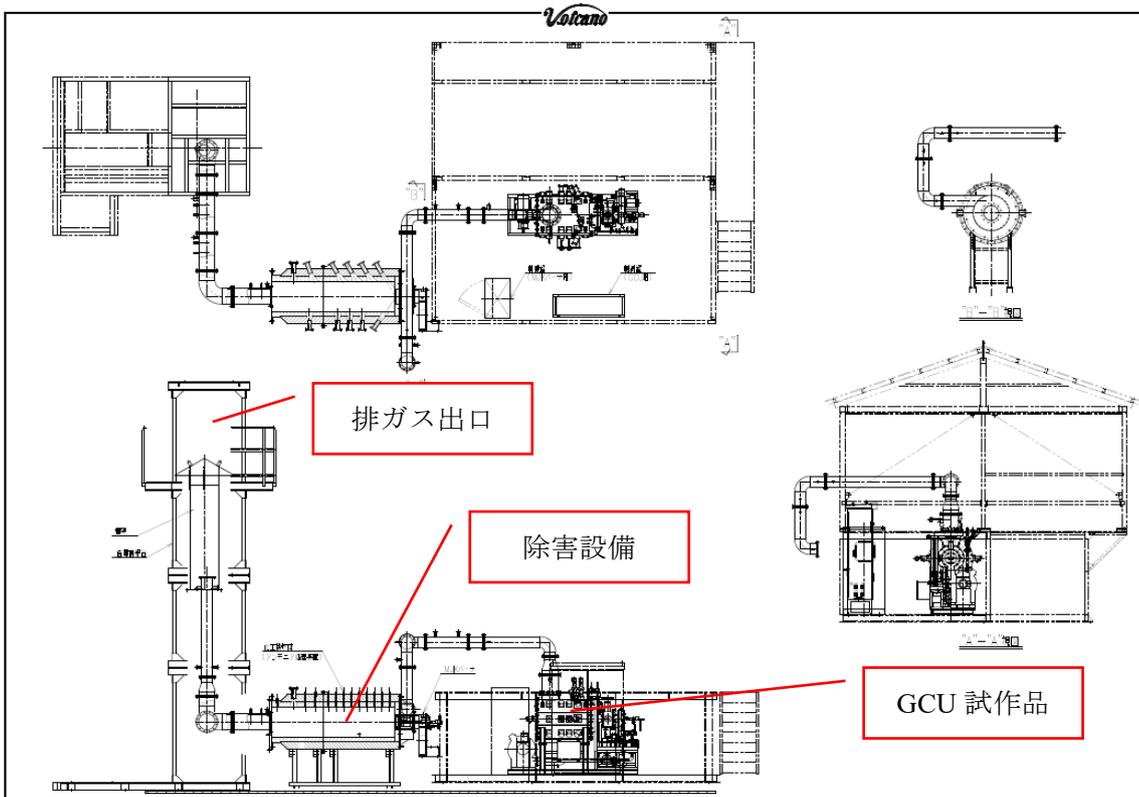


図 1 4 アンモニア燃料用 GCU 試作品の評価を行う試験場のレイアウト

また法規および安全性の事前確認のために、三田市の消防署へ訪問した。アンモニアの燃焼性、貯蔵量などについて相談をした結果、下記の通りの回答を得た。

- ・アンモニア自体は難燃性ということで、離隔距離（8m）も除外される。
- ・また貯蔵量においては、200kg 未満の範囲でアンモニアポンベを設置する分には届出の必要はない。

よって、本評価試験においてはアンモニアポンベを 200kg 未満（50kg×3 本まで）で留めることとした。また参考に、高圧ガス保安法および消防法関連法規について、図 1 5 に示す。

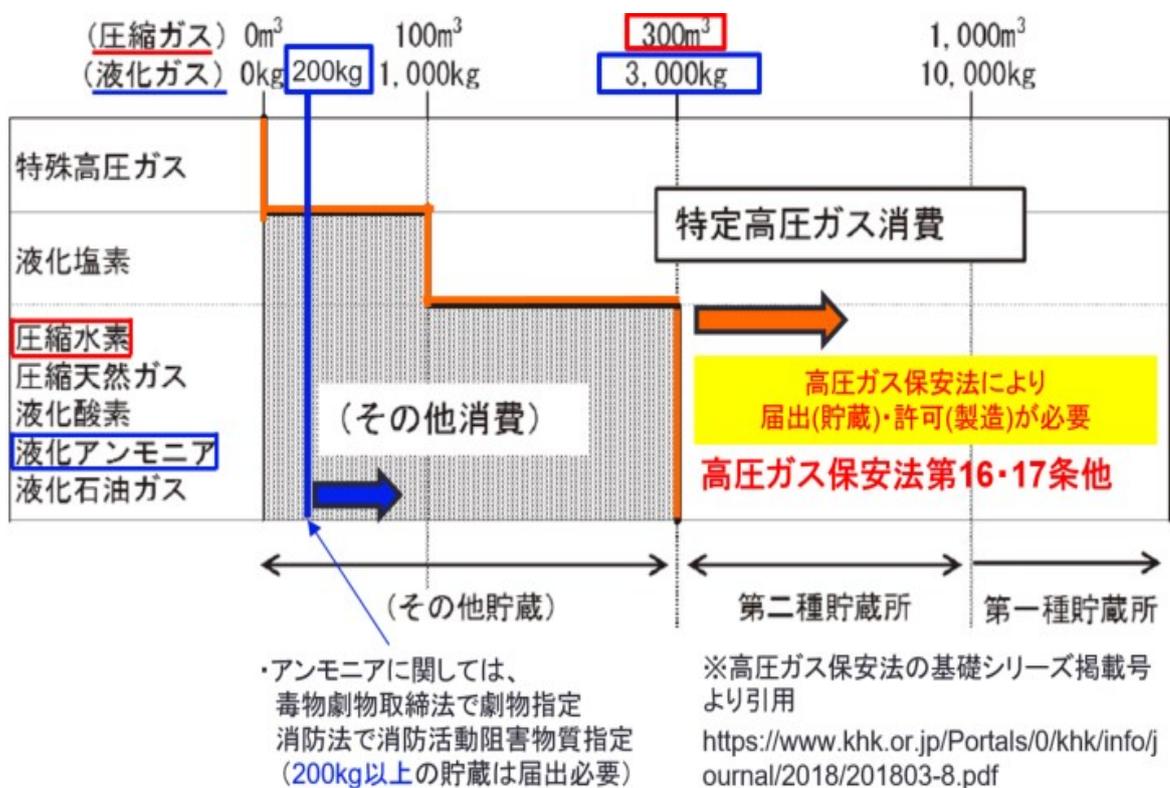


図 1 5 高圧ガス保安法および消防法関連法規

(3) 排ガス分析計の選定

目標値である「煙突出口排気ガス中において、アンモニア濃度 $\leq 25\text{ppm}$ を満足すること」を確認するための計測器選定の検討を行った。

アンモニア濃度計測器は高価であるため購入は控え、事業計画通りにレンタルとした。「Gaset 社製 FTIR 方式ポータブル型ガス分析計型式：DX-4000」を採用することとした。現在、アンモニア燃料船用エンジン開発を進めている MAN 社なども使用しているとの情報を得ている。

図 1 6 にアンモニア濃度計測器「Gaset 社製 FTIR 方式ポータブル型ガス分析計型式：DX-4000」の概要について示す。

DX-4000
FTIR方式ポータブル型
排ガス分析計

ポータブルタイプでありながら、燃焼排ガス等の水分を含んだ腐食性ガスの測定が可能でありなおかつ、最大50成分のガス成分を連続かつ同時測定が可能な分析計です。

システム構成
① 分析計
② サンプルングユニット
③ サンプルプローブ
④ プローブチューブ
⑤ 加熱導管
⑥ パーソナルコンピューター

■測定原理
物質を構成している分子はそれぞれ特有の振動数を持っており、その振動数に対応した赤外線のみ吸収されるため、吸収ピークの周波数分布よりその物質を識別する事が可能です。
干渉計により干渉光とされた赤外線はセル内でサンプルガスによる吸収を受け、各分子特有の周波数強度を得ます。これをフーリエ変換によりスペクトルを得、相互干渉補正・吸収バンド選択後、ライブラリー及びCLSアルゴリズムによりガスの特定と濃度を割り出します。

測定波形画面
測定濃度画面

図 1 6 アンモニア濃度計測器の概要 ※Gaset 社製カタログ引用

また今回、本計測器で測定する対象成分濃度レンジについて、参考に表 7 へ示す。

表 7 今回測定する対象成分濃度レンジ ※Gaset 社製カタログ引用

排ガス対象成分	濃度	
	Lowレンジ	Highレンジ
O ₂	0-25%	
N ₂ O	0-500ppm	0-5000ppm
NH ₃	0-500ppm	0-5000ppm

アンモニア濃度の測定などには、一般的にフーリエ変換赤外分光光度計（FTIR）の原理が用いられている。O₂濃度の測定原理については異なる。ここでは省略することとする。本計測器の内部構造についても、図17に示す。

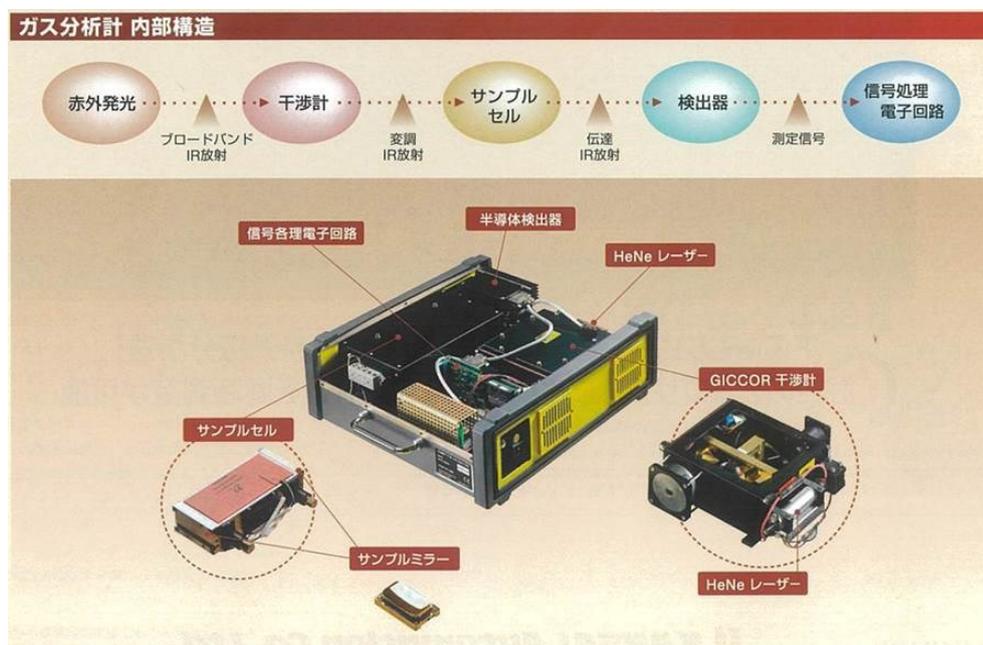


図17 アンモニア濃度計測器の内部構造 ※Gaset 社製カタログ引用

また本計測器の仕様について、参考として表8に示す。

表8 アンモニア濃度計測器の仕様 ※Gaset 社製カタログ引用

製品名	函体	製品名	加熱導管
材質	鉄（クリーム色：焼付塗装）	材質	テフロン
外径寸法	2150x600x600mm	使用圧力	Max.400kPa
重量	500kg（フル装備時）	温度	Max.200℃ 注1)
保護等級	IP54	電源	AC230V（オプション：AC115V）120W/m
製品名	エアークンディショナーユニット	製品名	サンプリングプローブ SP2000-H
冷却容量	A35℃/A35℃ 1500W A50℃/A35℃ 1000W	消費電力	800W
内部循環量	500m ³ /h	使用温度	180℃ 注2)
注1) アンモニアは水に溶けやすいため、凝縮させないように、ヒータ付きの導管を使用した。		フィルターエレメント	セラミック 2μm
注2) 温度が低いと吸引ポンプが動作しない仕組みとなっている。		ダスト濃度負荷	< 2g/m ³
		プローブチューブ	SUS316
		プローブ長	1m
		吸引ガス温度	Max.600℃
		吸引ガス圧力	0.4~6bar

(4) 試作したアンモニア燃料用 GCU を用いての構成部品仕様の最適化

ここでは、試作検討項目に対する確認結果（アンモニア燃焼処理量：10～60kg/h）について、それぞれ概要を述べる。

- ① ガスノズル仕様・・・燃焼処理するアンモニアのガスノズル仕様を決めるため、図8に示したガスノズル仕様に基づき、3種類の試作部品を用意し確認試験を行ったところ、良好な仕様を見出した。

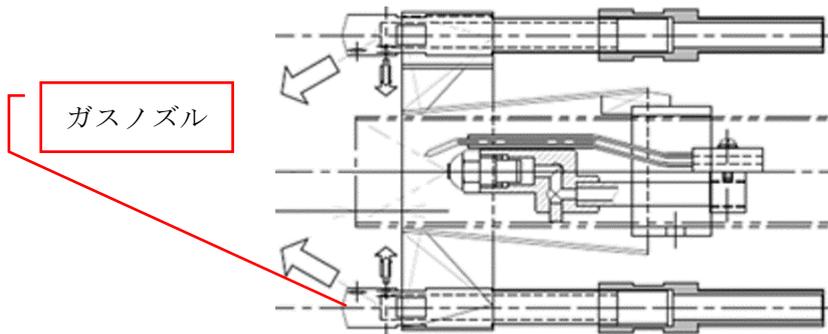


図8再掲示 ガスノズル仕様

- ② スワラに対するパイロット筒・ガスノズル・スロート相対位置・・・図9に基づき、L1、L2およびL3を調整できるように、試作部品を写真8に示すように用意し、確認試験を行ったところ、各寸法の最適化を図ることができた。

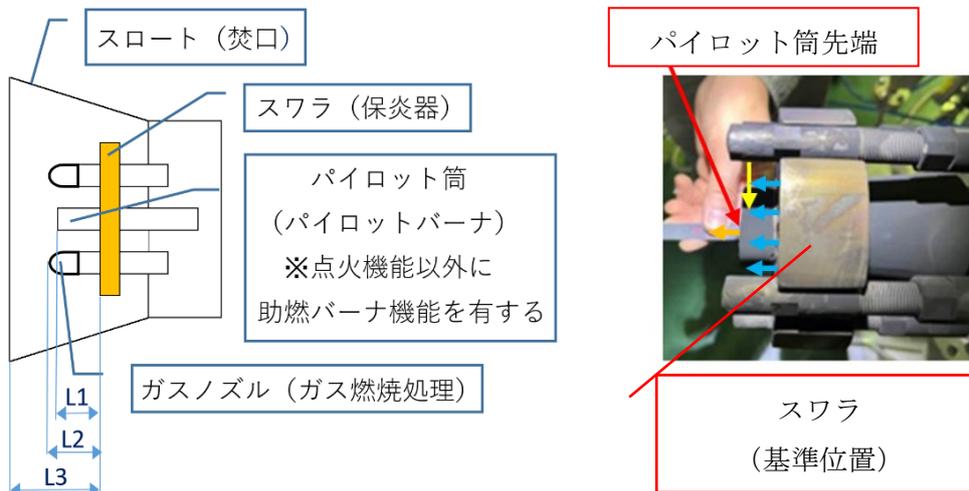


写真8 スワラに対するパイロット筒・ガスノズル・スロート相対位置

- ③ パイロットバーナ仕様・・・前述の図10の図面に基づき、パイロットバーナのノズル流量、本数、位置等について検討できるように試作部品を用意し、9種類の仕様で確認試験を行ったところ、良好な仕様を決めることができた。

- ④ スロート・・・入れ替え可能な複数の円筒ブロック化設計をして、写真9に示すように、形状や大きさを変えた断熱材構造のスロート1～3の試作部品を用意した。確認試験を行ったところ、良好な仕様を見出すことができた。

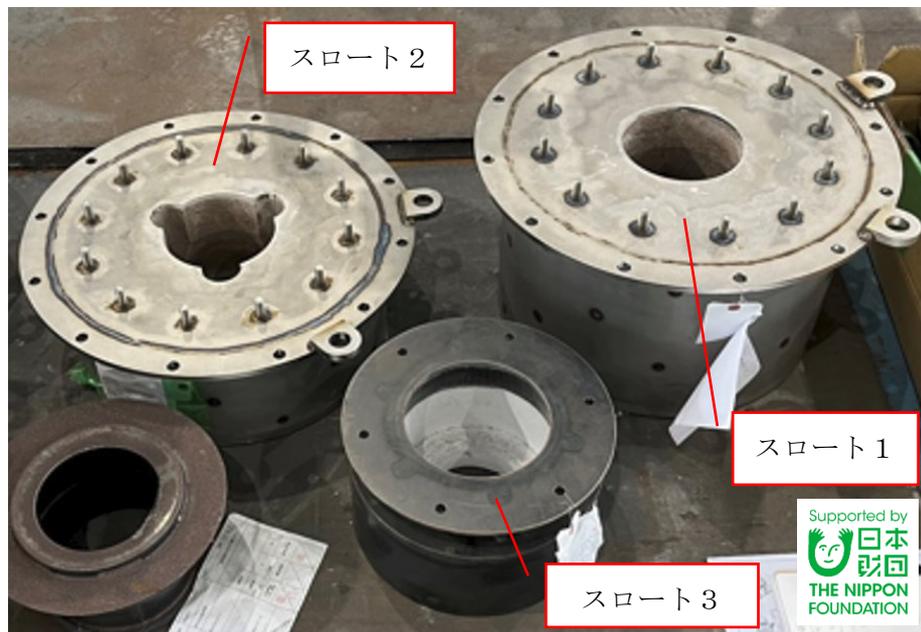


写真9 バーナスロート1～3

- ⑤ 炉体構造・・・写真10に示す通り、設計図面に基づき試作した。火炎観察ができる複数の覗き窓を設け、火炎検知のためのフレームアイ、および3本のパイロットバーナを炉体に設けることができるように試作品を用意した。確認試験を行ったところ、前述の①～④の結果を得ることができた。また今回の炉体設計寸法で、問題ないことも確認することができた。



写真10 炉体構造

(5)最適仕様のアンモニア燃料用 GCU 試作に対する評価試験結果

ここでは、前記(4)の検討結果を反映した「最適仕様のアンモニア燃料用 GCU 試作に対する評価試験結果」について述べる。

表 9 にアンモニア燃料用 GCU 試作品での評価試験結果一覧を示す。また図 1 8 にアンモニア燃料用 GCU 試作品での評価試験結果グラフを示す。

「3.1.1 アンモニア燃料用 GCU の設計」で述べたが、今回、船種としてはタグボートおよびバルクキャリアを想定した。

よって求められている燃焼処理量は、既存製品 LNG 燃料用 GCU である「型式：MECS-G25」の燃焼処理量（メタン 25kg/h：350kW 相当）となった。しかしながら、本評価試験を行う自社のアンモニア供給設備の能力限界より、アンモニア燃焼処理量の最大は 60kg/h（309kW 相当）となった。求められる燃焼処理量の 88%相当(309kW/350kW×100)である。70kg/h まで想定したバーナ設計をしているため、60kg/h までの評価ができれば、技術的目途が立つと判断している。またアンモニア燃焼処理量の最小は 10kg/h（52kW）まで確認を行った。

最適仕様のアンモニア燃料用 GCU 試作に対する評価試験を実施した結果、下記条件であれば、最大でもアンモニア濃度を 20.0ppm に抑えることが可能なため、25ppm 以下とする目標を達成することができた。

□アンモニア処理量 60kg/h～20kg/h：パイロットバーナ 1 本（1.5 ガロン×1⇒65.5kW）

□アンモニア処理量 10kg/h：パイロットバーナ 3 本（1.5 ガロン×3⇒196.6kW）

また前述の表 3 より、アンモニア混焼率は次の結果となった。

□アンモニア燃焼処理量最大の 60kg/h でのアンモニア混焼率：83%（軽油：17%）

□アンモニア燃焼処理量最小の 10kg/h でのアンモニア混焼率：21%（軽油：79%）

以上より、アンモニア燃料用 GCU の商品化に向けて技術的目処は立った。商品化においては、更にアンモニア混焼率の向上や燃焼処理量拡大（70kg/h 以上）の検討を加えていく。また、窒素混合ガス評価についても予定している。

表9 アンモニア燃料用 GCU 試作品での評価試験結果一覧

アンモニア燃焼処理量		排ガス濃度 (煙突出口排気ガス中)	パイロットバーナ本数 (ノズル: 1.5ガロン)		
(kg/h)	(kW)		1本 (1)	2本 (1&2)	3本 (1&2&3)
10	52	O ₂ 濃度 (%) ※参考値	/	16.8	16.0
		N ₂ O濃度 (p p m) ※参考値		13.4	11.2
		NH ₃ 濃度 (p p m)		151.3	20.0
		目標値: NH ₃ 濃度 ≤ 25ppm		×	○
20	103	O ₂ 濃度 (%) ※参考値	14.3	12.8	15.3
		N ₂ O濃度 (p p m) ※参考値	4.7	6.7	8.0
		NH ₃ 濃度 (p p m)	18.2	13.5	9.3
		目標値: NH ₃ 濃度 ≤ 25ppm	○	○	○
30	155	O ₂ 濃度 (%) ※参考値	13.1	14.3	14.4
		N ₂ O濃度 (p p m) ※参考値	0.0	9.9	4.9
		NH ₃ 濃度 (p p m)	5.7	27.9	11.3
		目標値: NH ₃ 濃度 ≤ 25ppm	○	×	○
40	206	O ₂ 濃度 (%) ※参考値	16.6	/	/
		N ₂ O濃度 (p p m) ※参考値	19.0		
		NH ₃ 濃度 (p p m)	7.3		
		目標値: NH ₃ 濃度 ≤ 25ppm	○		
50	258	O ₂ 濃度 (%) ※参考値	15.8	/	/
		N ₂ O濃度 (p p m) ※参考値	3.2		
		NH ₃ 濃度 (p p m)	3.2		
		目標値: NH ₃ 濃度 ≤ 25ppm	○		
60	309	O ₂ 濃度 (%) ※参考値	15.1	/	/
		N ₂ O濃度 (p p m) ※参考値	4.6		
		NH ₃ 濃度 (p p m)	4.6		
		目標値: NH ₃ 濃度 ≤ 25ppm	○		

アンモニア燃料用GCU試作品 目標到達状況

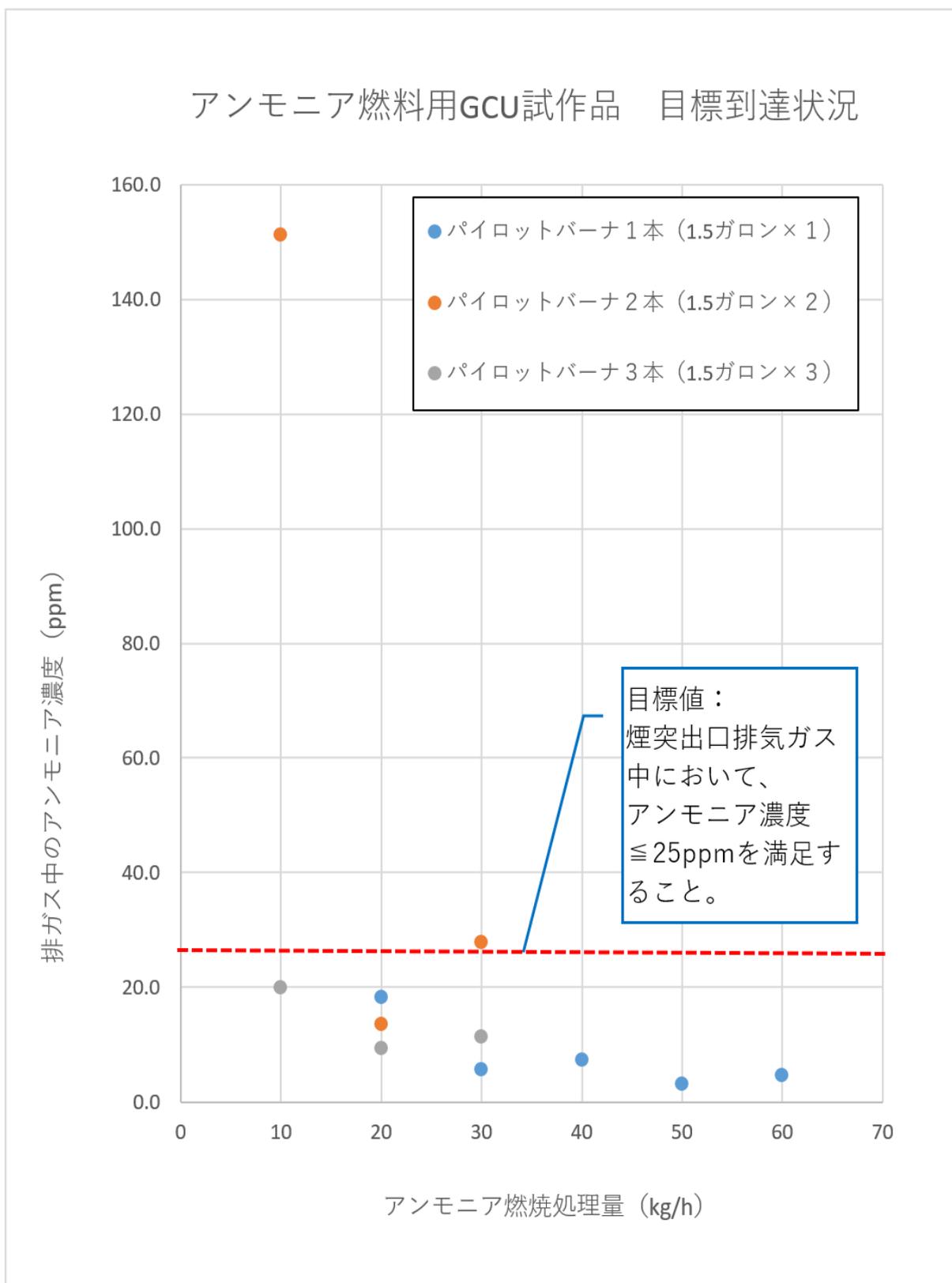


図18 アンモニア燃料用GCU試作品での評価試験結果グラフ

3.2 水素燃料用 GCU の技術開発

3.2.1 水素燃料用 GCU の設計

既に「3.1.1 アンモニア燃料用 GCU の設計」で述べているが、水素燃料の燃焼速度は高く(270~290cm/sec)、燃やしやすいが、逆火等がないように安全性に留意しておく必要がある。

水素燃料はアンモニア燃料と特性が大きく異なるため、計画段階ではアンモニア燃料用 GCU と水素燃料用 GCU を分けて設計する計画を立てていたが、前述の「3.1.2 アンモニア燃料用 GCU 試作および評価試験(5)最適仕様のアンモニア燃料用 GCU 試作に対する評価試験結果」で示した通り、燃料と空気を別々に供給して燃やすという燃やりにくい設計(拡散燃焼)にて、目標を達成することができた。

従って、アンモニア燃料と水素燃料の燃やし方を同じにすることが可能となった。その副産物として、アンモニア燃料と水素燃料において、2種類のバーナと炉体を作らず、逆火しにくい「燃料と空気を別々に供給して燃やす設計(拡散燃焼)」にて共通化を図ることができた。

今回船種としては、アンモニア燃料用 GCU と同様、タグボートおよびバルクキャリアを想定している。

よって求められている燃焼処理量最大は、既存製品 LNG 燃料用 GCU である「型式:MECS-G25」の燃焼処理量最大(メタン 25kg/h : 350kW 相当)となった。

従って本試験においては、水素燃焼処理量最大は 10kg/h (350kW 相当)とした。また水素燃焼処理量の最小は、便宜上、3kg/h (100kW 相当)まで確認を行うこととした。

次頁の表 10 に燃料流量・燃焼処理量と熱量との関係性(換算表)を示す。表 10 の黄色マーカーが対象燃料の値である。

また次頁の表 11 にパイロットバーナのノズル・本数の違いによる熱量および水素燃焼処理量最大および最小の場合の水素混焼率比較例を示す。熱量ベースで算出すると次式で示される。

$$\square \text{水素混焼率} = (\text{水素燃焼処理量} / (\text{パイロットバーナ} \& \text{助燃バーナ熱量} + \text{水素燃料処理量})) \times 100 (\%)$$

水素燃焼処理を行うためのパイロットバーナの燃料は、アンモニア燃料用 GCU と同様、従来の軽油(MGO)を用いており、軽油代替のバイオ燃料や E-fuel(合成燃料)のようなカーボンニュートラル燃料ではない。CO₂削減のためには、できるだけ軽油使用量を抑える必要がある。ランニングコスト低減にもつながるため、できるだけ軽油使用量を減らす検討も加えた。

表 10 燃料流量・燃焼処理量と熱量との関係性（換算表）

熱量換算		燃料流量・燃焼処理量 (kg/h)					
		A重油	軽油 (MGO)	メタン	メタン	アンモニア	水素
50	kW	4.2	4.1	9.0	3.6	9.7	1.5
100	kW	8.4	8.3	18.1	7.2	19.4	3.0
200	kW	16.9	16.6	36.2	14.3	38.7	6.0
300	kW	25.3	24.9	54.3	21.5	58.1	9.0
500	kW	42.2	41.5	90.5	35.9	96.8	15.0

表 11 パイロットバーナのノズル・本数の違いによる熱量および水素燃焼処理量最大および最小の場合の水素混焼率比較例

パイロットバーナ：軽油 (MGO) 水素：燃焼処理量／混焼率	1本流量および熱量			2本流量および熱量			3本流量および熱量		
	(L/h)	(kg/h)	(kW)	(L/h)	(kg/h)	(kW)	(L/h)	(kg/h)	(kW)
0.75ガロン	3.4	2.7	32.8	6.8	5.4	65.5	10.2	8.2	98.3
最大：10kg/h	-	-	91%	-	-	84%	-	-	78%
最小：3kg/h	-	-	75%	-	-	60%	-	-	50%
1.2ガロン	5.2	4.2	50.1	10.4	8.3	100.2	15.6	12.5	150.4
最大：10kg/h	-	-	87%	-	-	78%	-	-	70%
最小：3kg/h	-	-	67%	-	-	50%	-	-	40%
1.5ガロン	6.8	5.4	65.5	13.6	10.9	131.1	20.4	16.3	196.6
最大：10kg/h	-	-	84%	-	-	73%	-	-	64%
最小：3kg/h	-	-	60%	-	-	43%	-	-	34%
2.5ガロン	11.2	9.0	108.0	22.4	17.9	215.9	33.6	26.9	323.9
最大：10kg/h	-	-	76%	-	-	62%	-	-	52%
最小：3kg/h	-	-	48%	-	-	32%	-	-	24%

また船上においては、限られたスペースのため、各機器の面積・体積が重要となる。よって、既存の GCU サイズに収めること（コンパクト化）が望まれる。アンモニア燃料用 GCU と同様に、水素燃料用 GCU も表 2 に示す現行 LNG 燃料用小型 GCU 「型式：MECS-G25」サイズを目指すこととした。

副産物であるアンモニア燃料用 GCU との共通化をもとに、水素燃料用 GCU の設計パラメータの最適化も含み、次の検討項目が確認できるように、各試作部品について設計検討を進めた。

結果として、後ほど述べる「バーナにおける水素燃焼処理用ガスノズルの検討」、「水素燃焼処理用炉体の検討」、「燃焼空気ファンの検討」、「炉体冷却用ファンの検討」等々の設計検討をそれぞれ加え、水素燃料用 GCU に必要な構成要素部品を積み上げた結果、次の図 19 に示す通り、アンモニア燃料用 GCU と同様に、「L2, 530×W962×H2, 015(mm)」という大きさに収めることができ、LNG 燃料用 GCU と同等の大きさになることが確認できた。

図19に水素燃料用 GCU 試作設計（アンモニア燃料用 GCU 試作設計の共通化）の外観を示す。アンモニア燃料用 GCU と同様、次の流れで本開発事業を進めるため、下記②を考慮して、改造しやすく、部品を入れ替えやすい試作設計とした。

- ① 本試作設計通り、水素燃料用 GCU 試作品を完成させる。
- ② 水素が適正に燃焼処理できるように、各検討項目について確認試験を繰り返しながら、最適な形状や配置（最適化⇒最適仕様）を決定する。
- ③ 最適仕様の試作品にて評価試験を行う。

炉体は側面、フロントプレート、炉尻等で構成されている。図3、4で説明したバーナは、炉体のフロントプレートの中央に位置する。パイロットバーナおよび水素燃焼処理には燃焼用ファンを用いて燃焼空気を供給した。炉内にて水素燃焼処理が行われ、燃焼排ガスは冷却用ファンにて所定の温度に空冷され、排ガス出口から煙道に導かれ大気へ放出される。

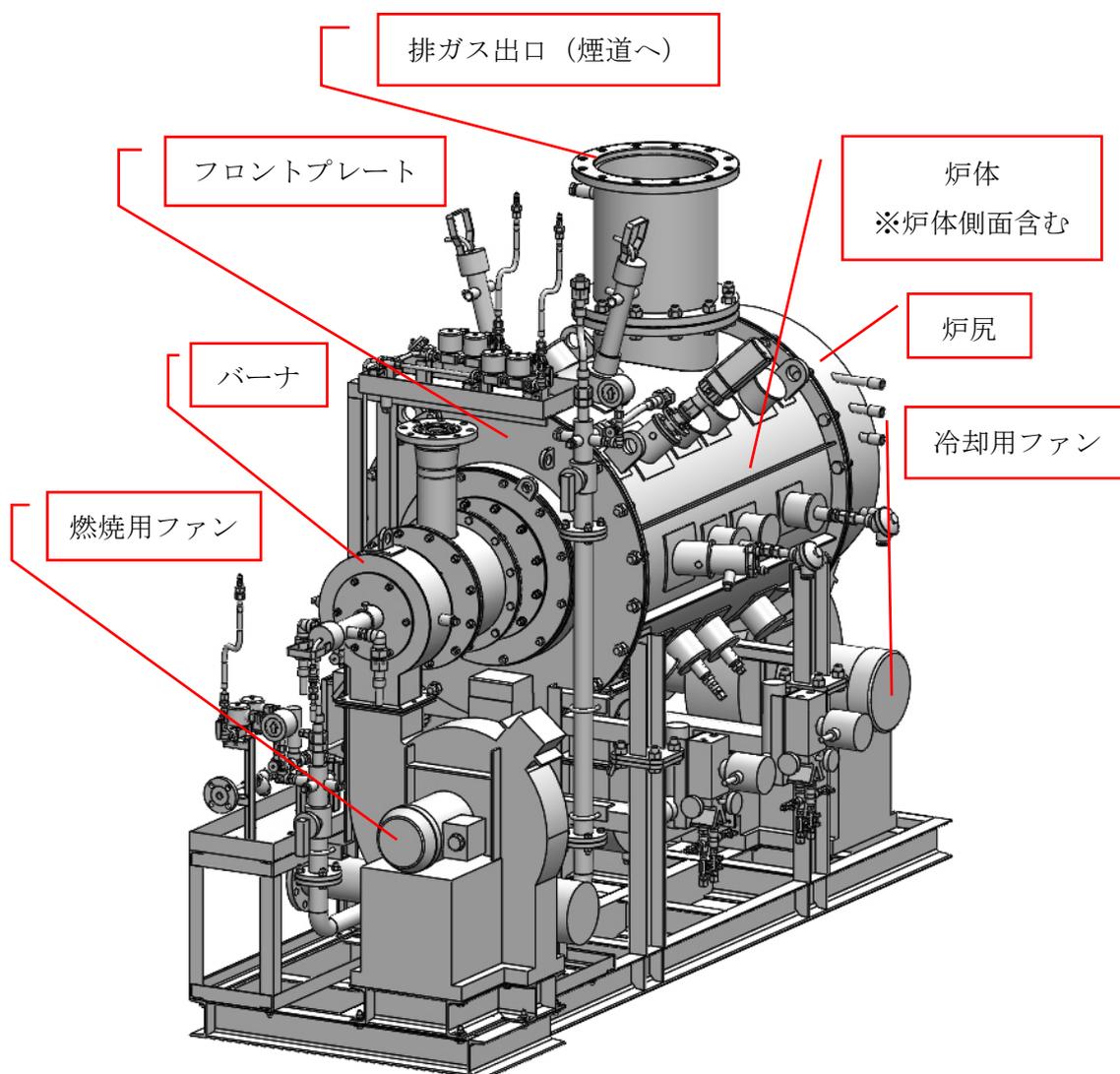


図19 水素燃料用 GCU 試作品（アンモニア燃料用 GCU 試作品共通化）の外観

また、図7で示した通り、制御盤はアンモニア燃料用 GCU と水素燃料用 GCU との共通設計とし、具体的には、油燃料を用いたパイロットバーナおよび補助バーナのコントロール（燃料、空気量）と、水素の燃焼処理量と空気量をコントロールするための制御盤に設計した。

試作検討部品についても水素燃料用 GCU 向けに一からの検討を加えた結果、アンモニア燃料用 GCU の検討の際に試作した対象部品で同等の性能が得られることが分かったため、アンモニア用試作部品を活用して評価試験を行うことにした。

ここでは目標値「煙突出口排気ガス中において、水素の排出濃度は 0ppm のこと」をクリアすることを目的として、更に設計パラメータの最適化も含み、次の検討項目が確認できるように各試作部品の設計検討をした。その結果、改造・変更が必要になるのは、燃料供給装置（アンモニア燃料⇒水素燃料）以外に、ガスノズル仕様およびスロート等がその対象になった。

- ① ガスノズル仕様・・・水素燃料用としての設計検討を行なった。
- ② スワラに対するパイロット筒・ガスノズル・スロート相対位置・・・アンモニア燃料用と同様、図9に示した寸法 L1、L2、L3 の再検討を加えることにした。
- ③ パイロットバーナ・・・自燃（パイロットバーナなし）可否や必要条件について検討した。
- ④ スロート・・・アンモニア燃料向け同様、入れ替え可能な複数の円筒ブロック化設計による図11に示したバーナスロート1～3を用いて、最適な形状や大きさの検討を加えた。水素燃料向けは、アンモニア燃料向けよりもシンプル化が可能である。
- ⑤ 炉体構造・・・前記表1の各燃料特性・燃焼特性より、水素の燃焼速度や火炎の長さ等を検討した結果、アンモニア燃料用 GCU の炉体と同じ構造で問題が無いことがわかったため、試作したアンモニア燃料用 GCU 炉体を活用することにした。

また、既に述べた GCU サイズとしては、各構成部品の検討結果を踏まえて、それを組み上げた結果、現行の LNG 燃料用 GCU と同等の大きさにできることが確認できた。

3.2.2 水素燃料用 GCU 試作および評価試験

(1) 設計図面および仕様に基づいた水素燃料用 GCU および構成部品の試作

ここでは設計図面および仕様に基づいて用意した水素燃料用 GCU および構成部品の試作について述べる。

写真 1 1 にバーナおよび炉体を示す。水素燃焼処理をするためのバーナは、燃焼室を有する炉体の前面に設けたフロントプレートに固定して設置している。

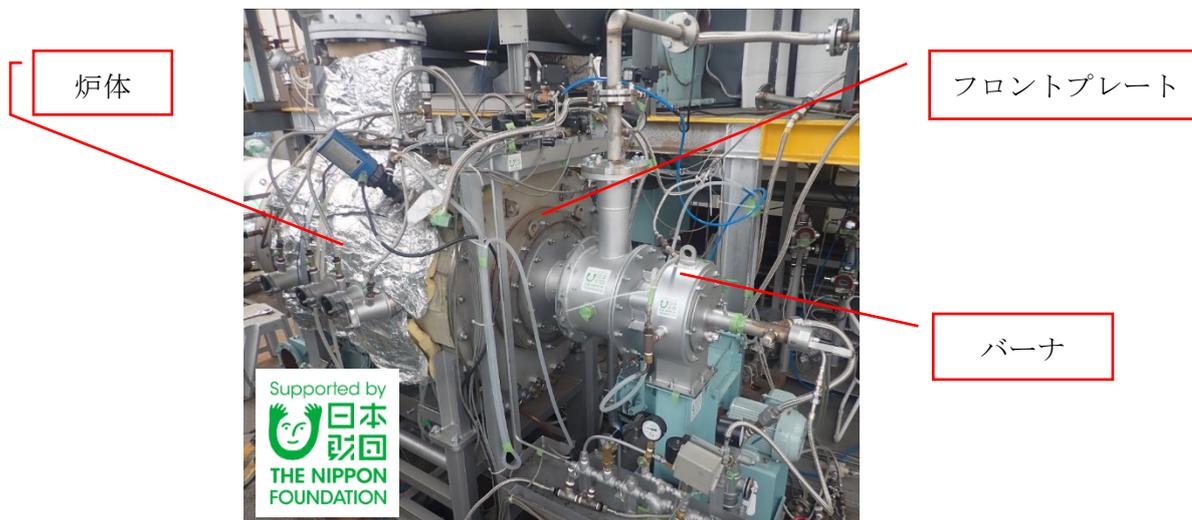


写真 1 1 バーナおよび炉体

また燃焼状態については、写真 1 2 に示す通り、炉体の下流側に位置する炉尻に、覗き窓を設けて、火炎観察を行えるようにした。

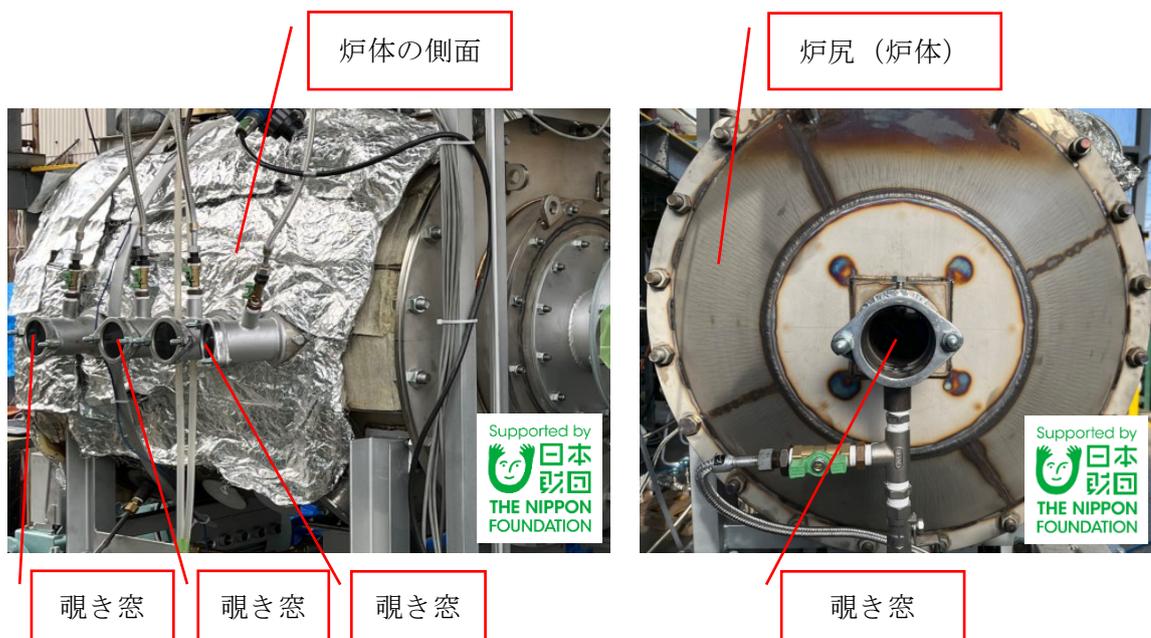


写真 1 2 覗き窓 (火炎観察)

目標値である「煙突出口排気ガス中において、水素の排出濃度は 0ppm のこと。」を確認するための煙道および排ガスサンプリング位置を写真 1 3 に示す。

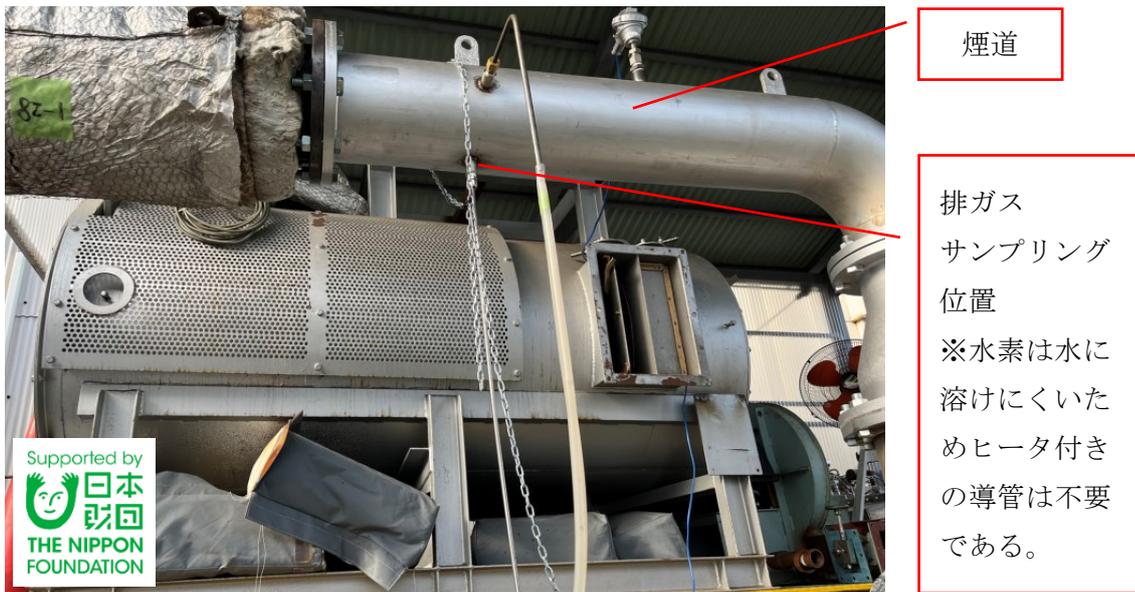


写真 1 3 煙道および排ガスサンプリング位置

バーナに燃料を導くための水素供給配管については写真 1 4 に示す。



写真 1 4 水素供給配管

また、燃料量や空気量をコントロールするための制御盤についても写真15に示す。



写真15 制御盤 (GCU 共通)

(2) 評価試験準備

水素燃料用 GCU の様々な要件を検討した結果、アンモニア燃料用 GCU の際に試作をした対象部品等で同等の性能が得られることが確認できたため、ここでは水素燃料供給側の準備を中心に行った。

図 20 に示す通り、水素燃料の貯蔵量は高圧ガス保安法に基づき、届出の要らない 300m³ 未満⇒224m³ 以下とした。

貯蔵形態：水素カードル

届出無し試験最大想定量：224m³



※川口液化ケミカル(株) 職HPより引用
<https://klchem.co.jp/blog/2012/11/post-1904.php>

- ※7m³ × 20本=140m³カードルと
- 7m³ × 12本=84m³カードルとの組合せ案
- ※直射日光を避ける(日除けが必要)
- ※特定高圧ガス扱い
- 300m³以上の貯蔵 … 第2種貯蔵所
- 1000m³以上の貯蔵 … 第1種貯蔵所

図 20 水素燃料の貯蔵量およびカードル

また写真 16 に示す通り、図 20 で取上げた水素燃料貯蔵量に基づき、評価試験用水素ボンベおよびカードルを用意した。



写真 16 評価試験用水素ボンベおよびカードル

(3) 排ガス分析計の選定

目標値である「煙突出口排気ガス中において、水素の排出濃度は 0ppm のこと。」を確認するための計測器選定の検討を行った。

ここでは、ガスディテクタ（新コスモス電機 X P-702Ⅲ S-A※表 1 2、図 2 1 を参照のこと）を用いて、水素濃度が 10ppm 以下での検知、および 30ppm での検知の 2 段階を計測することとした。また測定毎に目視（覗き窓）で逆火の有無確認も行った。

表 1 2 ガスディテクタの検知濃度 ※新コスモス電機 X P-702Ⅲ S-A) 取説抜粋

使用方法

3.使用方法（つづき）

- ④ ガス感度レベルは、ガス感度の高い順から [0] レベル、[1/5] レベル、[1] レベル、[2] レベル、[3] レベルの、5 段階に設定することができます。必要に応じてガス感度を変えて探知します。

メモ

- ガス感度レベルにおけるガス探知濃度は次の通りです。
 - [0]レベルの場合………10ppm 以下で探知します。
(検知可能漏洩量 : $3.3 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)
 - [1/5]レベルの場合………30ppm 程度で探知します。
- ガス感度ランプの横に表示された「露出」および「埋設」は、都市ガス配管のガス漏れを探知する場合のガス感度設定の目安です。露出配管の場合は[1]レベル、埋設配管の場合は[1/5]レベルに設定することを意味しています。



図 2 1 ガスディテクタ ※新コスモス電機 X P-702Ⅲ S-A) カタログ引用

水素燃料用 GCU 試作品の評価試験において、制御盤を操作している作業員について、写真 17 に示す。水素はアンモニアとは異なり、特に毒性がないため、評価試験の作業には、ヘルメット以外、保護具は使用していない。



写真 17 制御盤を操作している作業員

(4) 試作した水素燃料用 GCU を用いての構成部品仕様の最適化

ここでは、試作検討項目に対する確認結果（水素燃焼処理量：3～10kg/h）について、定性的につかんだ傾向について述べる。

- ① ガスノズル仕様・・・水素燃料向けに穴径は見直したが、その他は変更なしとなった。
- ② スワラに対するパイロット筒・ガスノズル・スロート相対位置・・・より良い相対位置関係を見出し、本確認試験を行った。
- ③ パイロットバーナ要否・・・点火以外は、自燃（パイロットバーナなし）にて燃焼処理が可能となった。ただし「目標値：水素の排出濃度は 0ppm のこと。」は未達である。逆にパイロットバーナを 1 本から 3 本まで増やしても、定性的にはパイロットバーナと水素燃焼処理の燃焼における空気の取り合いが発生して、燃焼性能が悪化することが確認された。
- ④ スロート・・・今回準備した最も小さいスロートが最適であった。しかしながら、「目標値：水素の排出濃度は 0ppm のこと。」には至らなかった。更なる見直しにより、目標値クリアは可能な見込みである。
- ⑤ 炉体構造・・・今回の炉体設計寸法で、問題ないことも確認することができた。

(5) 最適仕様の水素燃料用 GCU 試作に対する評価試験結果

今回船種としては、アンモニア燃料用 GCU と同様、タグボートおよびバルクキャリアを想定した。

よって求められている燃焼処理量最大は、既存製品 LNG 燃料用 GCU である「型式 MECS-G25」の燃焼処理量最大（メタン 25kg/h：350kW 相当）のため、本試験においては、水素燃焼処理量最大は 10kg/h（350kW 相当）とし、評価試験を実施した。また水素燃焼処理量の最小は、便宜上、3kg/h（100kW 相当）まで確認を行った。

表 1 3 に水素燃料用 GCU 試作品での評価試験結果一覧を示す。また図 2 2 に水素燃料用 GCU 試作品での評価試験結果グラフを示す。

最適仕様の水素燃料用 GCU 試作に対する評価試験を実施した結果、まだ現時点では水素濃度規制値が設けられていない中、自社自主基準として設定した「目標値：煙突出口排気ガス中において、水素の排出濃度は 0ppm のこと。」には到達しなかったが、現時点での到達レベルは次の通りである。

- ・水素処理量「10kg/h～3kg/h」において、点火以外は、自燃（パイロットバーナなし）で燃焼処理が可能となった。
- ・パイロットバーナ（助燃バーナ）を 1 本から 3 本まで増やしても、定性的にはパイロットバーナと水素燃焼処理の燃焼における空気の取り合いが発生して、燃焼性能が悪化することが確認された。よって、パイロットバーナは点火のみに使用した。
- ・その結果、水素燃焼処理量が 10～6kg/h において、排ガス中の水素濃度は 30ppm、また、水素燃焼処理量が 4～3kg/h において、排ガス中の水素濃度は 10ppm に留まった。

ただし前述の通り、パイロットバーナ（助燃バーナ）なしの自燃での水素燃焼処理が可能であることが確認できたため、水素混焼率は次の結果となった。

水素燃焼処理量最大の 10kg/h での水素混焼率：100%（自燃⇒軽油：0% ⇒水素専焼）

水素燃焼処理量最小の 3kg/h での水素混焼率：100%（自燃⇒軽油：0% ⇒水素専焼）

以上より、商品化に向け水素燃料用 GCU の技術的目処は立った。しかしながら、水素燃料用 GCU については、今後の規制値も睨みながら、スロートの更なる改良により、目標達成に近付けていくことが課題である。また商品化に向けて、窒素混合ガス評価についても予定している。

表 1 3 水素燃料用 GCU 試作品での評価試験結果一覧

水素燃焼処理量		排ガス濃度 (煙突出口排気ガス中)	自燃 (パイロットバーナなし) およびパイロットバーナ本数			
(kg/h)	(kW)		自燃	1本 (No.1)	2本 (No.1&2)	3本
3	100	O ₂ 濃度 (%) ※参考値	19.1	パイロットバーナ (助燃バーナ) と水素燃焼処理で燃焼のための空気の取り合いが発生して、燃焼性能が悪化することが確認された。よって、パイロットバーナは点火のみに使用した。	/	/
		逆火有無	無			
		H ₂ 濃度 (p p m)	10			
		目標値：水素濃度 0ppm	△			
4	133	O ₂ 濃度 (%) ※参考値	18.6			
		逆火有無	無			
		H ₂ 濃度 (p p m)	10			
		目標値：水素濃度 0ppm	△			
6	200	O ₂ 濃度 (%) ※参考値	18.3			
		逆火有無	無			
		H ₂ 濃度 (p p m)	30			
		目標値：水素濃度 0ppm	△			
8	267	O ₂ 濃度 (%) ※参考値	18.0			
		逆火有無	無			
		H ₂ 濃度 (p p m)	30			
		目標値：水素濃度 0ppm	△			
9	300	O ₂ 濃度 (%) ※参考値	17.7			
		逆火有無	無			
		H ₂ 濃度 (p p m)	30			
		目標値：水素濃度 0ppm	△			
10	350	O ₂ 濃度 (%) ※参考値	17.4			
		逆火有無	無			
		H ₂ 濃度 (p p m)	30			
		目標値：水素濃度 0ppm	△			

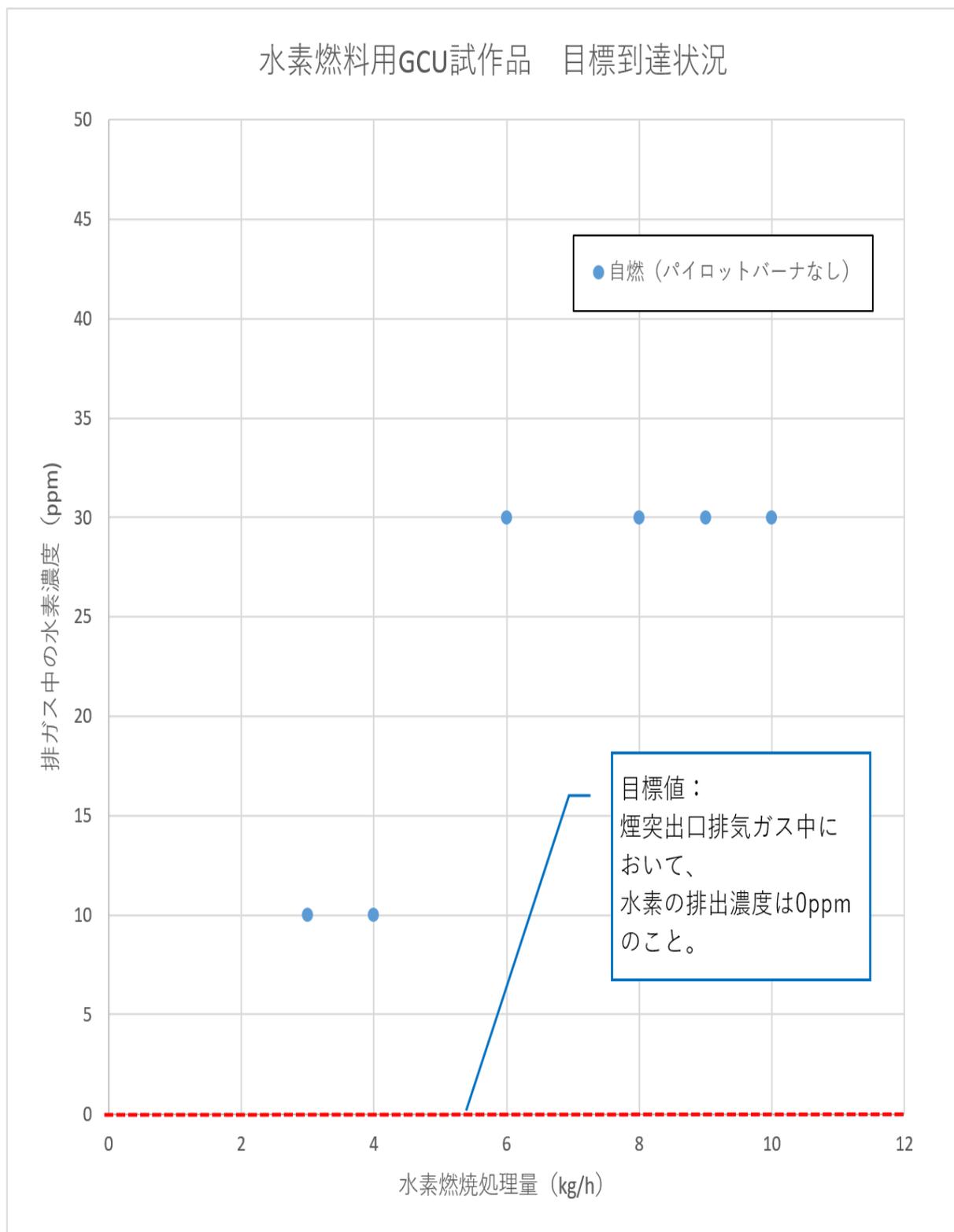


図 2 2 水素燃料用 GCU 試作品での評価試験結果グラフ

4. 目標の達成状況

4.1 アンモニア燃料用 GCU 試作品

アンモニア燃料用 GCU の試作品による評価試験を実施した結果、煙突出口排ガス中において、最大でも 20.0ppm のアンモニア濃度の排出に抑えることができたため、船級 NK 基準に設けられている人体への影響 考慮したアンモニア濃度 \leq 25ppm を満足するという目標を達成することができた。

また参考値ではあるが、アンモニア混焼率は次の結果となった。

- アンモニア燃焼処理量最大の 60kg/h でのアンモニア混焼率：83%（軽油：17%）
- アンモニア燃焼処理量最小の 10kg/h でのアンモニア混焼率：21%（軽油：79%）

4.2 水素燃料用 GCU 試作品

水素燃料用 GCU 試作品による評価試験を実施した結果、まだ現時点では水素濃度規制値が設けられていない中、自社自主基準として設定した「目標値：煙突出口排気ガス中において、水素の排出濃度は 0ppm のこと。」には到達しなかった。現時点での到達レベルは次の通りである。

- ・水素処理量「10kg/h～3kg/h」において、点火以外は、自燃（パイロットバーナなし）で燃焼処理が可能となった。
- ・パイロットバーナ（助燃バーナ）を 1 本から 3 本まで増やしても、定性的にはパイロットバーナと水素燃焼処理の燃焼における空気の取り合いが発生して、燃焼性能が悪化することが確認された。よって、パイロットバーナは点火のみに使用した。
- ・その結果、水素燃焼処理量が 10～6kg/h において、排ガス中の水素濃度は 30ppm、また、水素燃焼処理量が 4～3kg/h において、排ガス中の水素濃度は 10ppm に留まった。
- ・しかしながら、スロートの更なる改良や、測定精度の見直しにより、目標達成が可能と考えているため、継続して商品化に向けて検討していく。

参考値ではあるが、水素混焼率は次の結果となった。

- 水素燃焼処理量最大の 10kg/h での水素混焼率：100%（自燃⇒軽油：0% ⇒水素専焼）
- 水素燃焼処理量最小の 3kg/h での水素混焼率：100%（自燃⇒軽油：0% ⇒水素専焼）

5. 2022年度の実施内容の概要

5.1 実施内容

(1) アンモニア燃料用 GCU の設計

アンモニアと液体燃料（軽油）、アンモニアと窒素の混合ガスと液体燃料を混焼（同時燃焼）させる GCU 用バーナおよび炉体の設計を検討した。

なおアンモニアは燃えにくいいため、本事業計画書段階では、予め燃料と空気を混ぜてから燃やすという燃やしやすい方法（予混合燃焼）で設計を考えていた。

しかしながら、燃料と空気を別々に供給する燃やりにくい方法（拡散燃焼）について、様々な議論を重ねた結果、バーナのスロートに対して火炎が冷やされにくい断熱材構造の検討を加えることや、炉内温度を上げるためのパイロットバーナ（助燃バーナ）の本数追加（油量を多くするような調整）を行うことにより、燃えやすくする技術確立（逆火との両立）ができる可能性を見出した。

よって、水素用に設計計画していた拡散燃焼でも、アンモニアを燃焼させることができる可能性が出てきたため、敢えてこの難しい方法で設計してチャレンジすることとした。

そして、アンモニアの燃焼に必要な構成部品をそれぞれ検討したところ、各仕様が明確になった。また火炎を冷やさないための断熱材を用いたスロートの形状、パイロットバーナ（助燃バーナ）の仕様等、実際に試作品で確認試験をしてみないと判断できない構成部品については、簡単に交換が可能になるように設計した。

船種としては、タグボートおよびバルクキャリアを想定した。GCU サイズとしては、それぞれの構成部品を組み上げて設計したところ、「L2, 530×W926×H2, 015(mm)」という大きさにすることができ、現行の LNG 燃料用 GCU と同等レベルの大きさに収めることができた。

(2) アンモニア燃料用 GCU 試作および評価試験

上記(1)アンモニア燃料用 GCU の設計をもとに、アンモニア燃料用 GCU を試作した。

今回、燃えにくいアンモニアを燃やりにくい構造で燃やせるように、様々な構成部品の検証を行える構造とするとともに、構成部品については、それぞれ複数種類の試作を用意した。

これらを組み合わせて試験を行ったところ、アンモニアを燃焼できる組合せを見出すことができた。

そして、適正な組合せに組み上げて試作したアンモニア燃料用 GCU 試作品を用いて、燃料に対する空気量の制御を加え、火が消えないことを炎検知装置（フレームアイ）で確認した。アンモニアは逆火しにくい特性であるが、アンモニア燃焼処理量毎の評価試験において、それぞれの条件で逆火しないことも確認できた。

煙突出口排気ガス中において、最小で 3.2ppm、最大でも 20.0ppm のアンモニア濃度の排出に抑えることができたため、25ppm 以下とする目標を達成することができた。

(3) 水素燃料用 GCU の設計

水素専焼、水素+窒素の混合ガスも燃焼可能な GCU 用バーナの設計および GCU 用炉体の設計を行った。アンモニア燃料用 GCU と同様、船種としてはタグボートおよびバルクキャリアを想定している。GCU サイズとしては、水素の燃焼処理に必要な構成部品を組み上げて設計したところ、「L2, 530×W926×H2, 015(mm)」という大きさにすることができ、現行の LNG 燃料用 GCU と同等レベルの大きさに収めることができた。

(4) 水素燃料用 GCU 試作および評価試験

上記(3)水素燃料用 GCU の設計をもとに、水素燃料用 GCU を試作した。なお、設計段階で検討した結果、アンモニア用の炉体とバーナで、水素を安全に燃焼できることが分かったため、アンモニア用の試作品として製作した炉体とバーナを使用し、評価試験を行うこととした。

試作した水素燃料用 GCU を用いて評価試験を行ったところ、各燃焼処理量に対する空気量の制御を加え、それぞれの燃焼処理量において、逆火が一度も起こらなかったことを目視（覗き窓）で確認できた。

また水素燃料用 GCU 試作品による評価試験において、煙突出口排気ガス中の水素濃度についても、計測器を用いて測定を行った。まだ現時点では水素濃度規制値が設けられていない中、自社自主基準として設定した排ガス中の水素濃度は 0 ppm という目標までは届かなかった。

水素燃焼処理量が 10～6kg/h において、排ガス中の水素濃度は 30ppm、また水素燃焼処理量が 4～3kg/h において、排ガス中の水素濃度は 10ppm に留まった。よって、現時点での到達レベルは次の通りとなった。

- ・水素処理量「10kg/h～3kg/h」において、点火以外は、自燃（パイロットバーナなし）で燃焼処理が可能となった。
- ・パイロットバーナ（助燃バーナ）を 1 本から 3 本まで増やしても、定性的にはパイロットバーナと水素燃焼処理の燃焼における空気の取り合いが発生して、燃焼性能が悪化することが確認された。よって、パイロットバーナは点火のみに使用した。
- ・しかしながら、スロートの更なる改良や、測定精度の見直しにより、目標達成が可能と考えているため、継続して商品化に向けて検討していく。

以上が水素燃料用 GCU 試作品での評価試験結果である。

6. 今後の予定

本開発事業により、アンモニア燃料用 GCU および水素燃料用 GCU の技術開発をすることができた。

今後は商品化に向け、アンモニア燃料用 GCU においては、①燃焼処理量拡大の検討、②排気温度を考慮した O₂ 濃度（空気比）の調整などの制御定数の最適化が課題となる。

また水素燃料用 GCU においては、スロートの更なる改良や、測定精度の見直しにより、目標達成が可能と考えているため、継続して商品化に向けて検討していく。

アンモニア燃料用 GCU および水素燃料用 GCU の技術開発が完了したため、商品としての販売開始時期についても検討を始めている。

アンモニア燃料船については、IEA 等の公的機関発表の通り、2030 年代に一定の市場規模が期待できる。

また水素燃料船および緊急時の水素燃料処理についても、2030 年代に一定の市場規模が期待できる。

よって、ここでは参考に、2030 年および 2035 年の自社販売予定台数を示す。

① 市場規模（対象船舶の船種、隻数等）

日本造船工業会(2022年3月公表値/100総トン以上の船舶)の年別竣工隻数より、2015～2020年の7年間の日中韓3ヶ国の平均年間建造数は表14より2,437隻である。

表 1 4 日中韓 3 ヶ国の平均年間建造数

日中韓 国別建造数予測		根拠（年別竣工隻数）///日本造船工業会 2022年3月 公表値 100総トン以上の船舶						
国名	右記平均による年間建造規模	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
日本	482	520	514	493	458	493	488	410
韓国	1,462	2,332	578	1,850	2,311	1,737	1,189	237
中国	493	740	277	420	426	421	323	845
3ヶ国合計	2,437	3,592	1,369	2,763	3,195	2,651	2,000	1,492

その中で対象船舶の船種は、「バルクキャリア、タンカー、コンテナ船」である。市場実績として、この対象船種は表15より船舶全体の84%(52.9%+14.8%+15.8%)を占めるため、ここでは2,047隻(2,437隻×84%)を市場規模とする。

表 1 5 対象船種割合

	Bulk Carrier	Tanker	Fully Cellular Container
構成比	52.9%	14.8%	15.8%

② 販売予定台数

国際エネルギー機関 IEA が発表した船舶燃料の水素、アンモニア、バイオエネルギー比率（公表値）を表 1 6 に示す。

表 1 6 水素、アンモニア、バイオエネルギー比率※表 1 8（Net Zero by 2050/IEA）

構成比	2020	2030	2050		2035	2040
アンモニア	0%	8%	46%	→	16%	36%
水素	0%	2%	17%		4%	12%
バイオエネルギー	0%	7%	21%		14%	16%

市場規模の 2,047 隻にて、上記の水素、アンモニア、バイオエネルギー比率より隻数換算すると表 1 7 のようになる。

表 1 7 水素、アンモニア、バイオエネルギー比率による隻数換算

隻数	2020	2030	2050		2035	2040
アンモニア	0	164	942	→	328	737
水素	0	41	348		82	246
バイオエネルギー	0	143	430		287	328

ただし対象市場規模（本隻数）は、GCU とボイラ向けバーナの総数である。LNG 燃料船での実績では、GCU：ボイラ向けバーナ＝約 1：9 であるが、アンモニア燃料が「劇物・毒物」のため、人体への安全性を考慮して、安全装置としての併載があると想定し、ここでは 3：7 とする。また水素燃料も燃えやすい特性を考慮した安全性重視で、ここでは GCU：ボイラ向けバーナ＝3：7 と仮定する。今後の新規建造プロジェクトの様子を見て改訂していく予定である。

3ヶ国での自社シェアを 30%として、アンモニア燃料用 GCU、水素燃料用 GCU の自社販売台数（目標値）をそれぞれ示す。

■対象製品：アンモニア燃料用 GCU

- ・日中韓建造向け販売台数 ※3ヶ国での自社シェア：30%以上
- ・2030年：15台以上(164×0.3×0.3) 2035年：30台以上(328×0.3×0.3)

■対象製品：水素燃料用 GCU

- ・日中韓建造向け販売台数 ※3ヶ国での自社シェア：30%以上
- ・2030年：4台以上(41×0.3×0.3) 2035年：7台以上(82×0.3×0.3)

注：アンモニア燃料船、水素燃料船とも、政府・国際機関・資源関連企業・造船所・エンジンライセンサーからの計画数発表が現時点でないため、上記予測台数に裏付けはない。今後発表されていくロードマップ、関連各社の計画台数により更新していく。

以上より、日本郵船様のタグボートへのアンモニア燃料用 GCU 搭載を実現させ、更に水素燃料船やアンモニア燃料船の実証試験船にも積極的に販売していき、カーボンニュートラル実現に向けて次世代燃料市場の GCU 世界トップシェアを目指していきたい。

参考として 2021 年 5 月に IEA（国際エネルギー機関）が発表した「Net Zero by 2050」の抜粋を表 1 8 に示す。

表 1 8 Net Zero by 2050 / IEA（国際エネルギー機関）

Category	2020	2030	2050
Road transport			
Share of PHEV, BEV and FCEV in sales: cars	5%	64%	100%
two/three-wheelers	40%	85%	100%
bus	3%	60%	100%
vans	0%	72%	100%
heavy trucks	0%	30%	99%
Biofuel blending in oil products	5%	13%	41%
Rail			
Share of electricity and hydrogen in total energy consumption	43%	65%	96%
Activity increase due to modal shift (index 2020=100)	100	100	130
Aviation			
Synthetic hydrogen-based fuels share in total aviation energy consumption	0%	2%	33%
Biofuels share in total aviation energy consumption	0%	16%	45%
Avoided demand from behaviour measures (index 2020=100)	0	20	38
Shipping			
Share in total shipping energy consumption: Ammonia	0%	8%	46%
Hydrogen	0%	2%	17%
Bioenergy	0%	7%	21%
Infrastructure			
EV public charging (million units)	1.3	40	200
Hydrogen refuelling units	540	18 000	90 000
Share of electrified rail lines	34%	47%	65%

Note: PHEV = plug-in hybrid electric vehicles; BEV = battery electric vehicles; FCEV = fuel cell electric vehicles.

7. まとめ

日本財団様より、本助成事業委託開発の機会を得ることができた。

また日本郵船様には本開発事業の指導者になっていただいた。

その結果、アンモニア燃料用 GCU 技術開発および水素燃料用 GCU 技術開発のそれぞれが完了した。商品化に向けての設計仕様や今後の課題を明らかにすることができた。

ここに感謝の意を示す。

「この報告書は BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました」

(一社)日本船用工業会

〒105-0001

東京都港区虎ノ門一丁目13番3号 (虎ノ門東洋共同ビル)

電話：03-3502-2041 FAX:03-3591-2206

<https://www.jsmea.or.jp>