

「船上CCS搭載に関する取り組み」

2019.08.02
三菱造船
マリンエンジニアリングセンター
開発部

Mitsubishi Shipbuilding Co., Ltd.

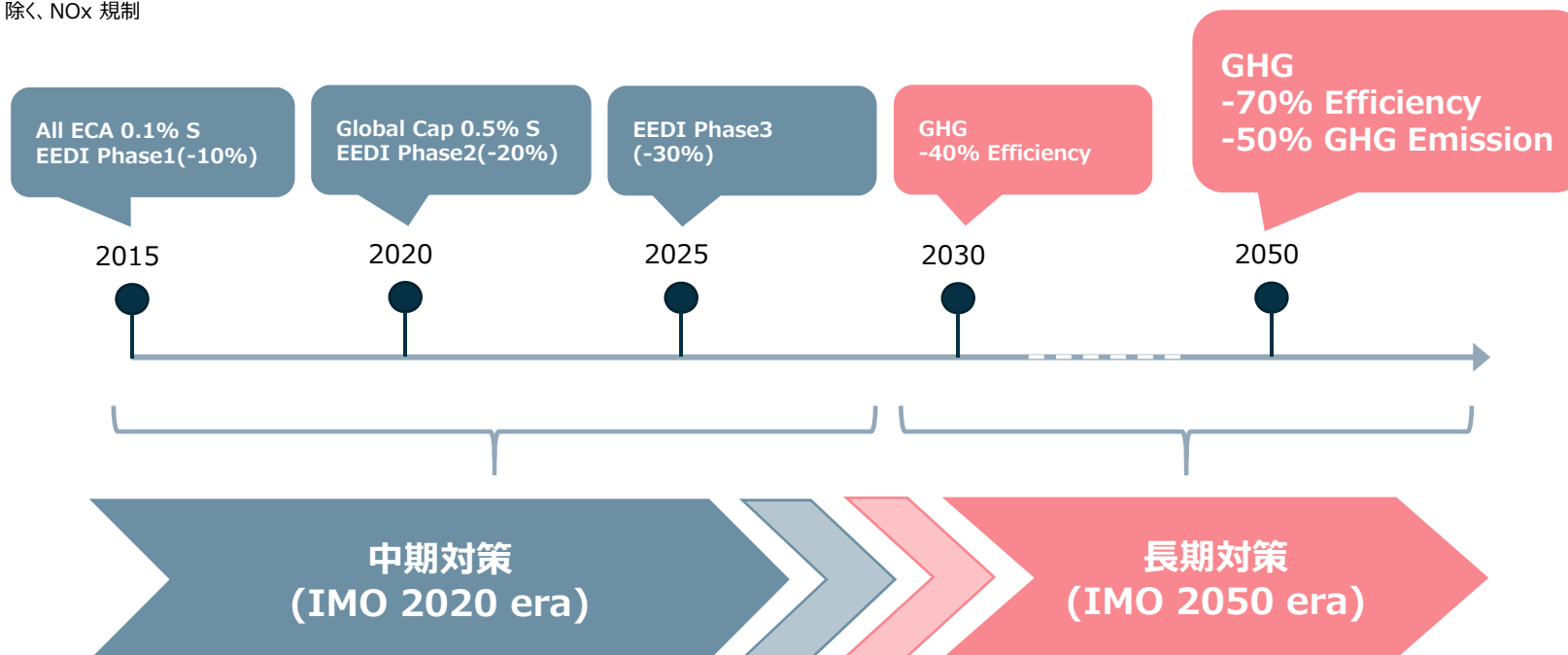
1. IMO 環境規制と対策候補
2. IMO 規制 2050(GHG) 対策候補
3. 船舶 ゼロエミッション検討 (2018年度実施: 船上CCS搭載)
4. 船舶 ゼロエミッション検討 (2019年度: 検討予定)

海外情報 :

- ① 大気中から直接CO2回収 (DAC)
- ② DecarbonICE™ Project Platform (Denmark MDC)
- ③ MAN機関 アンモニア燃料への対応
- ④ HyMethShip project (HORISON 2020 program)
- ⑤ Ocean Hyway Cluster (Norway)
- ⑥ Hydrogen project within CMB (Belgium)

IMO 環境規制ステップ

注: 除く、NOx 規制




- 低速運航 (EEDI)
- 船型最適化 (EEDI)
- MGO/適合油 (SOx)
- 排ガススクラバー (SOx)
- LNG 燃料 (EEDI & SOx)

- 非化石 / 人工合成燃料
- 再生可能エネルギー
- Carbon Free (H2, NH3)
- バイオ燃料
- CO2 回収
- 炭素クレジット, 排出権取引
- 電気推進
- …etc

2. IMO 規制 2050(GHG) 対策候補

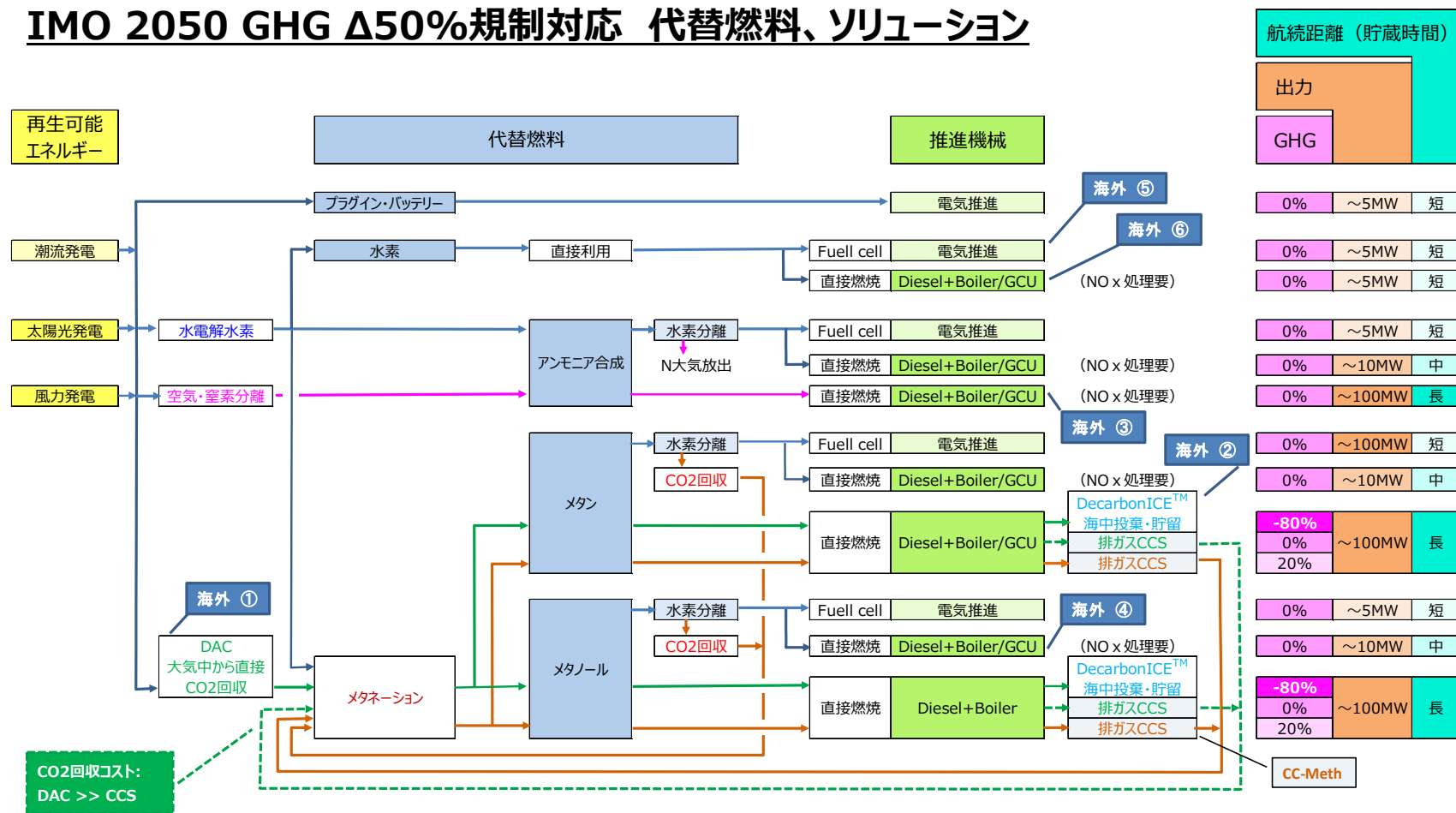
GHGゼロエミッションのための長期対策

- 代替燃料 = Carbon Free燃料、非化石 / 人工合成燃料の利用が有効な対策
(下表 比較表参照)
- 再生可能エネルギーの直接利用 = 不安定・変動要素大きく、活用に難あり
- バイオ燃料 = ライフサイクルとしてのCO2の排出量評価が必要
- 電気推進 = エネルギー密度が低い (用途、目的により有効)

	Carbon free 燃料		メタネーション燃料	
	Hydrogen (H2)	Ammonia (NH3)	Methane (CH4)	Methanol (CH3OH)
製造	再生可能エネルギー利用 水電解	$N_2+3H_2\Rightarrow 2NH_3$ (水素製造：同左)	$4H_2+CO_2\Rightarrow CH_4+2H_2O$ (水素製造：同左)	$3H_2+CO_2\Rightarrow CH_3OH+H_2O$ (水素製造：同左)
物性	<ul style="list-style-type: none"> • -252.9°C • SG=0.071 • 141.9MJ/kg • 水素脆性 	<ul style="list-style-type: none"> • -33.4°C • SG=0.674 • 18.63MJ/kg • 毒性 	<ul style="list-style-type: none"> • -162°C • SG=0.422 • 48.0MJ/kg • 毒性 	<ul style="list-style-type: none"> • 64.5°C • SG=0.792 • 19.96MJ/kg
船用機関 実績	無し	無し	実績 多	実績あり
NOx 対策	SCR	SCR	SCR 又は EGR	同左 又は 28% 水混入
SOx 対策	不要 (SOx free)	不要 (SOx free)	不要 (SOx free)	不要 (SOx free)
輸送 & 貯蔵	極低温技術	低温技術 (既存技術)	深冷技術 (既存技術)	通常配管技術
燃料ハンドリング	<ul style="list-style-type: none"> • 真空防熱 2重管配管 • BOG 管理 	<ul style="list-style-type: none"> • 2重管配管 • BOG 管理 	<ul style="list-style-type: none"> • 2重管配管 • BOG 管理 	<ul style="list-style-type: none"> • 2重管配管
難易度	高			低

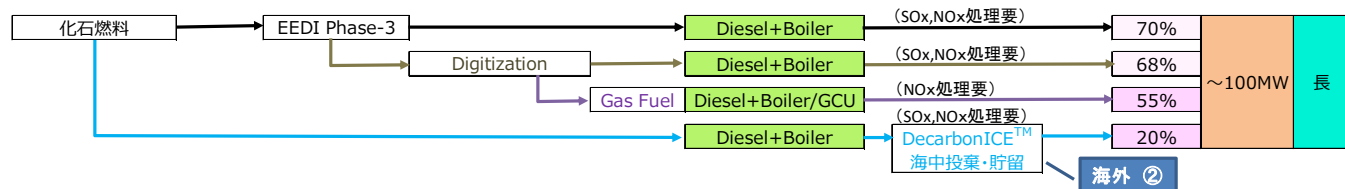
2. IMO 規制 2050(GHG) 対策候補

IMO 2050 GHG Δ50%規制対応 代替燃料、ソリューション



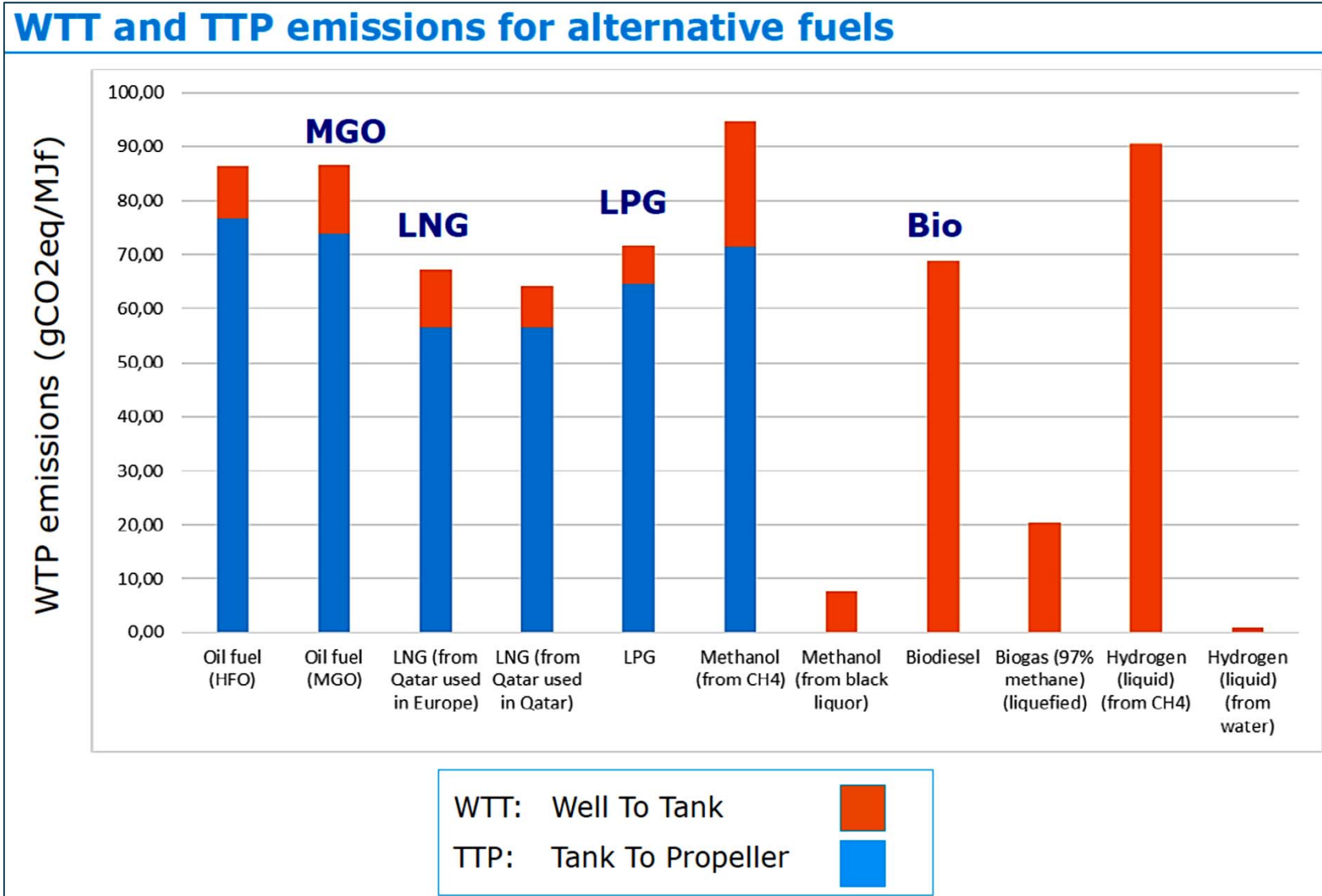
注：① バイオ燃料 ⇒ 航空燃料用途が主体になると想定し、外した。
 ② 有機ケミカルハイドライド ⇒ 水素輸送の媒体として有望だが、船内における脱水素の技術と分離トルエンの回収・循環スキーム想定が未済のため、今回は外した。

IMO 2020~30 GHG規制対応 ソリューション

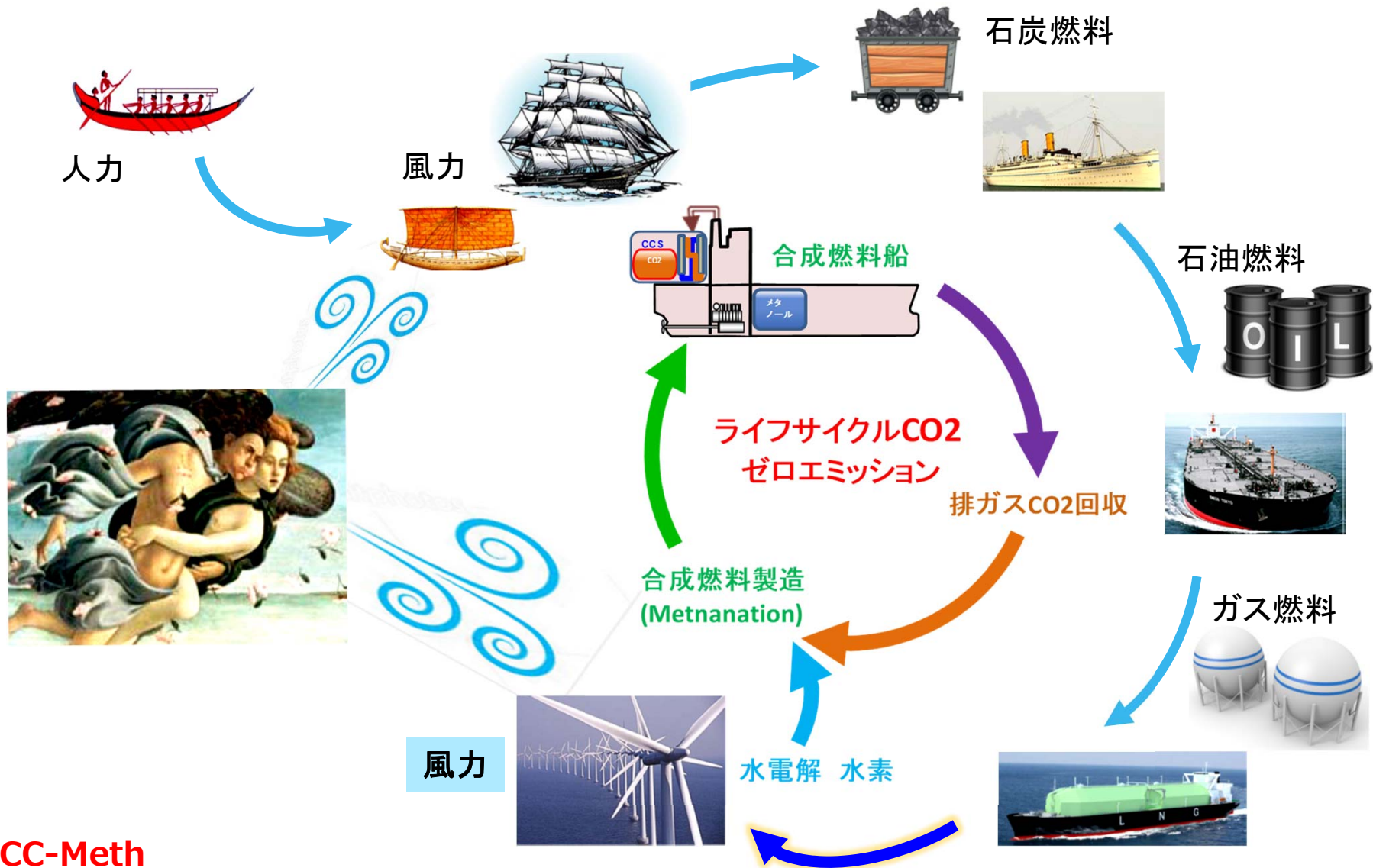


2. IMO 規制 2050(GHG) 対策候補

参考資料：ライフサイクル CO2排出量評価 (DNV・GL)

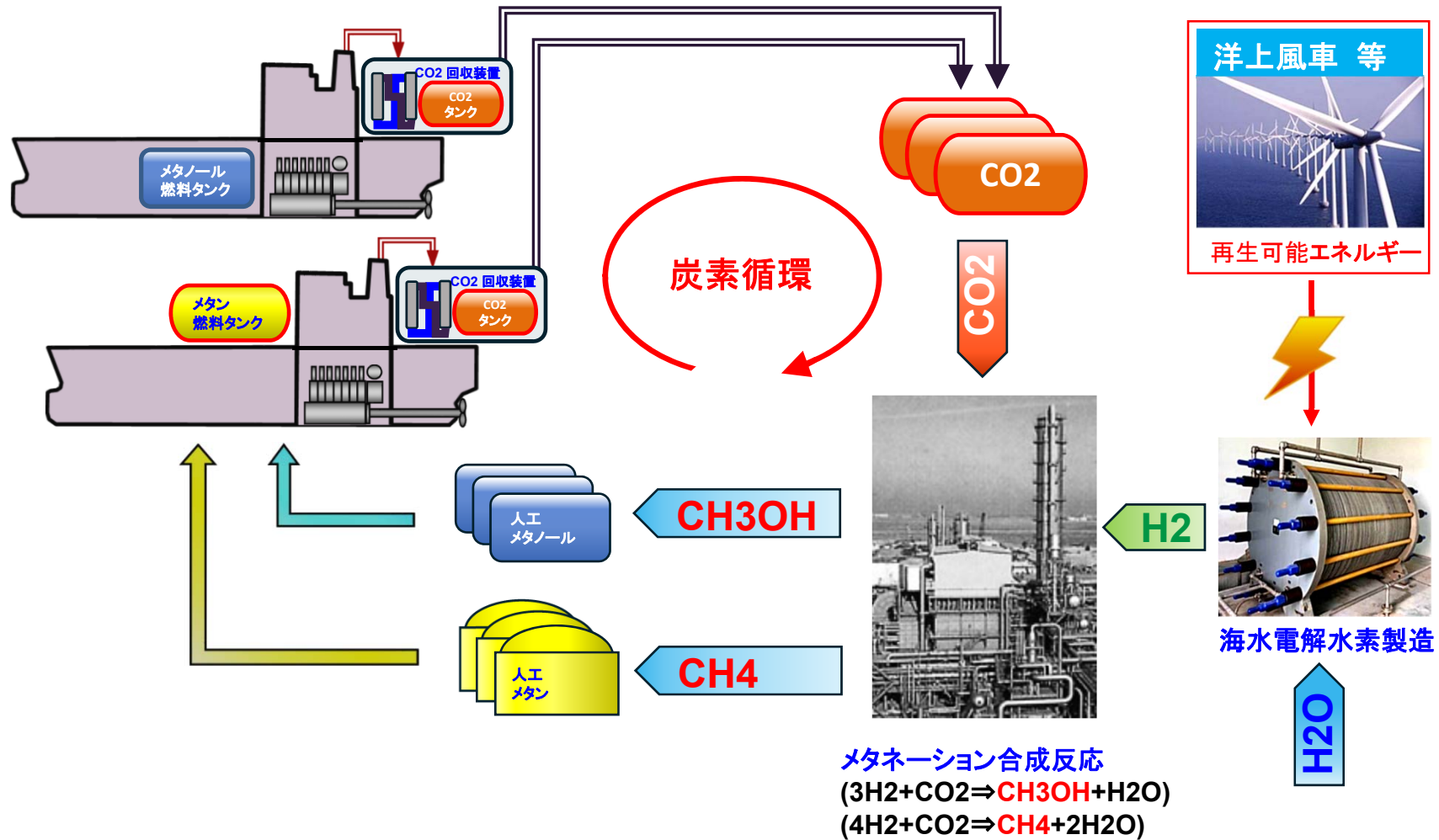


3. 船舶 ゼロエミッション検討 (2018年度実施: 船上CCS搭載)



CC-Meth
(Carbon Cycle system utilizing Methanation)

3. 船舶 ゼロエミッション検討 (2018年度実施: 船上CCS搭載)

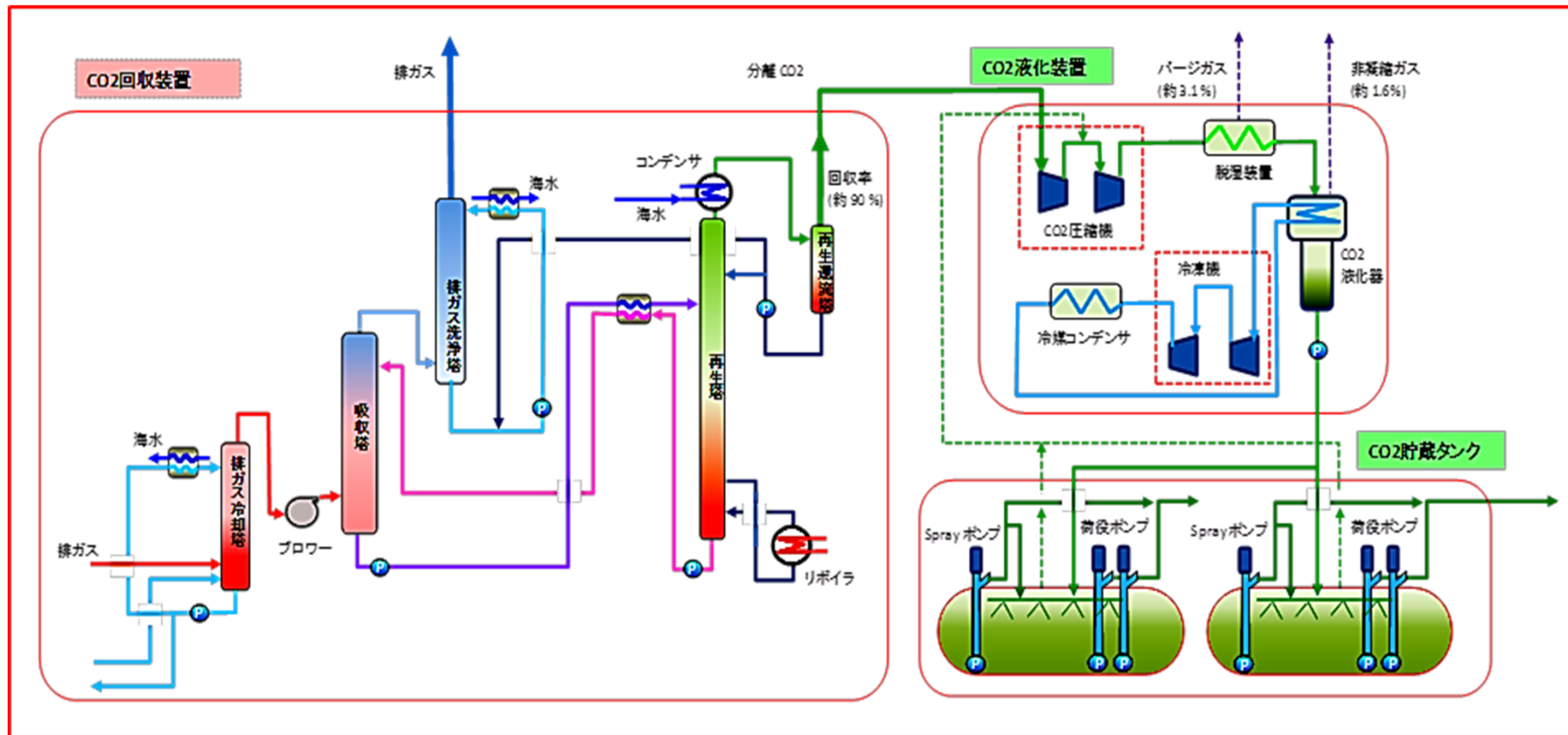


CC-Meth
(Carbon Cycle system utilizing Methanation)

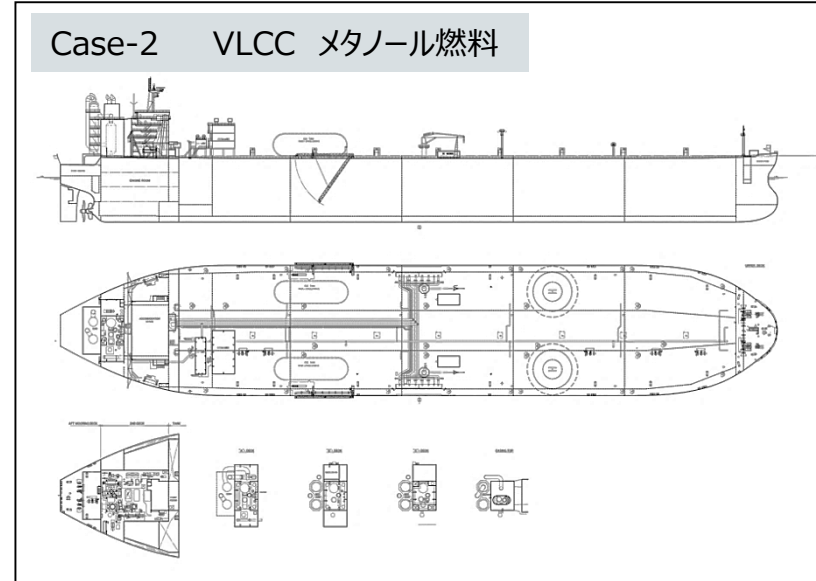
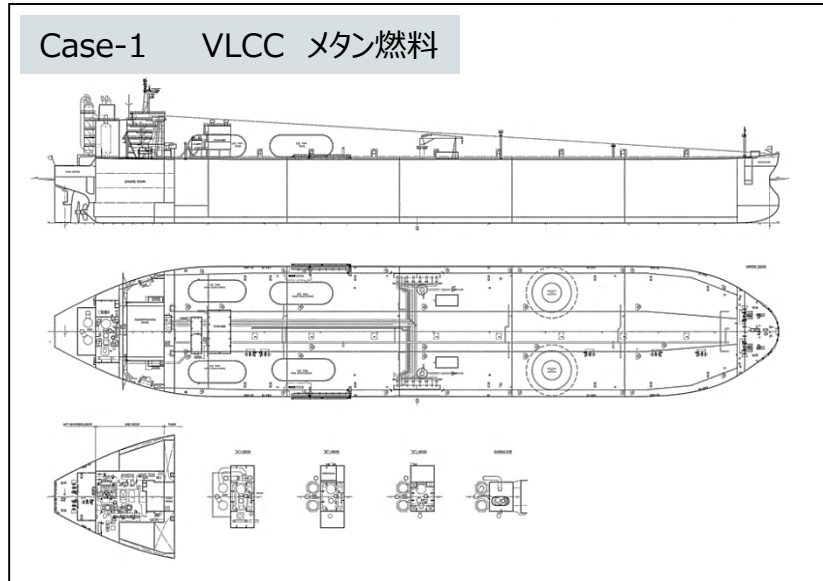
3. 船舶 ゼロエミッション検討 (2018年度実施: 船上CCS搭載)

船上CO₂回収装置

- 液体アミン吸収法 回収装置
- 液化装置
- 貯蔵装置



3. 船舶 ゼロエミッション検討 (2018年度実施: 船上CCS搭載)



		Case-1: VLCC-メタン燃料	Case-2: VLCC-メタノール燃料
主機関		7G80ME-C9.5-GI-EcoEGR MCR 21,060 kw, NOR 18,950 kw (90%)	7G80ME-C9.5-GIM-EcoEGR MCR 21,060 kw, NOR 18,950 kw (90%)
CO2 排出量 @ NOR		168.0 t/d	209.0 t/d
CO2 削減率		合計 削減率 85.7% (CO2 回収装置効率= 90%, CO2 液化バージガス ロス= 3.1%, CO2 液化非凝縮 ロス= 1.6%)	
CCS装置駆動 追加エネルギー		+ 40.0%	+ 47.0%
		右記の機器駆動	<ul style="list-style-type: none"> CO2 回収装置 = 吸収液ポンプ、排ガブロワー、冷却海水ポンプ CO2 液化装置 = CO2 圧縮機、冷凍装置 CO2 再生装置加熱蒸気
CCS装置重量影響 (Dead weight adjust)		- 4,550 ton (- 1.53 %)	- 5,000 ton (- 1.68 %)
概略船価		85 M\$	85 M\$
追加投資	ガス燃料設備	+ 21.5 %	+ 16.0 %
	CCS設備	+ 34.0 %	+ 36.9 %

3. 船舶 ゼロエミッション検討（2018年度実施：船上CCS搭載）

メタネーション燃料コスト 試算

再生可能エネルギー利用 電力単価（仮定）	人工合成 メタン *1	人工合成 メタノール *2
3.0 ¥/kW-h	91.0 ¥/kg	54.2 ¥/kg
4.0 ¥/kW-h	116.5 ¥/kg	63.8 ¥/kg
5.0 ¥/kW-h	142.0 ¥/kg	73.5 ¥/kg
6.0 ¥/kW-h	167.5 ¥/kg	83.2 ¥/kg
7.0 ¥/kW-h	193.0 ¥/kg	92.8 ¥/kg
参考 市場価格 2017 4Q	49.3 ¥/kg	42.9 ¥/kg

*1 メタン合成電力 = 日本エネルギー研究所「我が国におけるPower to gasの可能性」2015年12月

メタン液化電力 = HIS Markit PEP review 2015-13

*2 メタノール製造電力 = 三菱重工業技報Vol35-No6(*3)

参考：欧州の洋上風車電力単価 8.1¥/kW-hよりは安価になると期待。

日本の洋上風車電力単価は 30.0 ¥/kW-h。

3. 船舶 ゼロエミッション検討 (2018年度実施: 船上CCS搭載)

投資回収試算結果 (金利、DWT減少等は考慮せず)

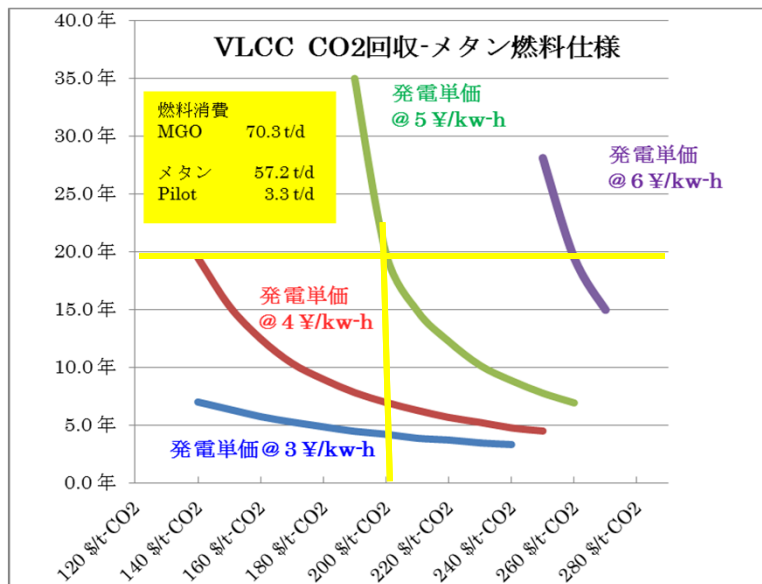
➤ ベース船 :

既存の船はMGO (@600\$/t) を燃料に使い続けることとし、GHG削減目標を達成できないことから、燃料課金制度を適用し、消費燃料に則して、カーボンプライス全体価格相当を賦課されるとした。

➤ CO2回収船 (人工合成ガス燃料適用船) :

本船には燃料課金は適用無しとした。回収したCO2を明示的カーボンプライス (炭素税・排出権) 価格相当で売買できる事とし、MGO燃料とメタネーション燃料との差額、及びベース船の燃料課金との差額を投資回収計算の原資とした。

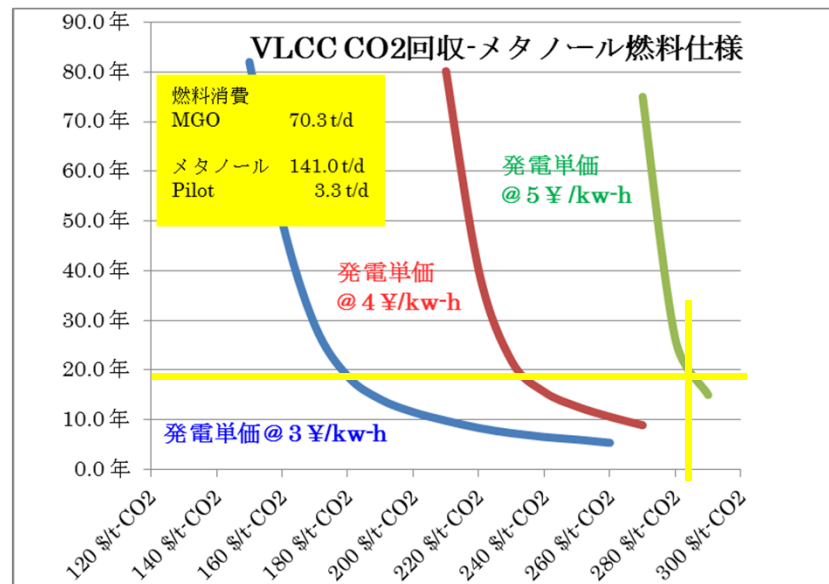
Case-1



VLCC CO2回収-メタン燃料

発電単価 @5¥/kw-h 相当で、カーボンプライス全体価格 (燃料賦課金)を200\$/t-CO2 相当、回収CO2を20\$/t-CO2 相当で取引できれば投資回収20年程度が期待出来る。

Case-2



VLCC CO2回収-メタノール燃料

発電単価は@5¥/kw-h相当でも、カーボンプライス全体価格 (燃料賦課金) が280\$/t-CO2 相当、回収CO2を28\$/t-CO2) 相当で取引出来なければ、投資回収20年程度が期待出来ない。

検討まとめ（Mitsubishi CC-Meth）

CO2回収/液化/貯蔵装置（CCS）

装置・技術については陸上大型設備として実績も多く、技術的には確立。
船舶に搭載装備することにも問題はないと評価。

VLCC CO2削減率 Δ 85%を確認。以下の条件であれば投資回収は約20年：

- 燃料課金制度の適用。（カーボンプライス全体価格相当を賦課。200～240\$/t-CO2）
- 再生可能エネルギー利用電力単価。（約 4～5¥/kw）
- 回収したCO2を明示的カーボンプライス（炭素税・排出権）価格相当で売買。（20 to 24\$/t-CO2）

今後の課題：ハード面

- CCS装置の小型化、省エネ化、コストダウン
- 正確な計量・記録システム（回収CO2量、及びCO2削減率）
- メタネーション燃料バンカリング設備、及びCO2荷揚げ設備

今後の課題：ソフト面

- MBM（Market-based Measure）
- 燃料課金制度とCO2取引スキーム
- CO2削減船の認定スキーム

小型船のGHG削減に関しては、

船上に大規模なO2回収・貯蔵装置を搭載する事は搭貨重量の減少量が大きく、また投資額の割合も非常に高いため課題も多い。そのため、以下の対応策も並行して検討必要。

- 電気推進（プラグインバッテリー）
- 代替燃料：バイオ燃料

2019年度：下記2船型のコンセプト設計纏めを計画

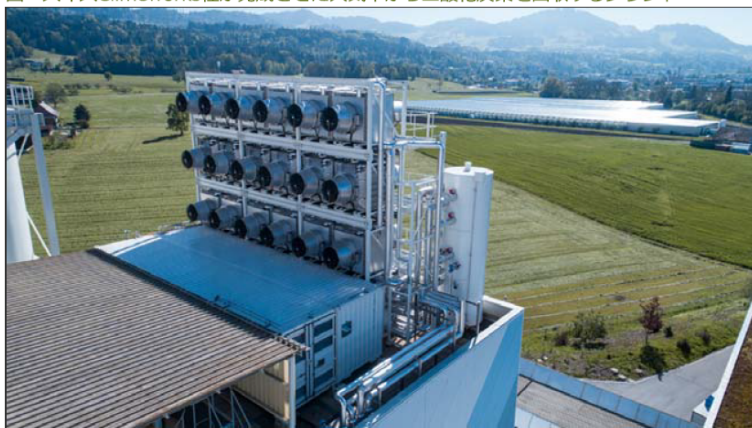
1. 船上CCS搭載 ⇒ 20,000TEU C/S
2. アンモニア燃料適用 ⇒ 80 Bulk Carrier

スイス Climeworks 社

大気中の二酸化炭素を回収するプラントがスイスで稼働開始、年間900トン回収可能

スイスClimeworks社は2017年5月31日（現地時間）、大気中から二酸化炭素（CO₂）を回収するプラントをチューリヒ近郊に完成させ、稼働を始めたと発表した。この種のプラントが稼働を始めるのは世界初だとしている。特許技術を活用して、大気からCO₂だけを集めるという。現在のところ、このプラントは年間900トンのCO₂を回収する能力を持っているという。

図 スイスClimeworks社が完成させた大気中から二酸化炭素を回収するプラント



/sites/default/files/images/news/news3974_pic1.png

出所 Climeworks社

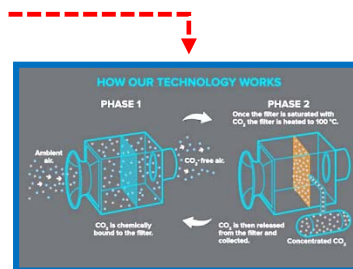
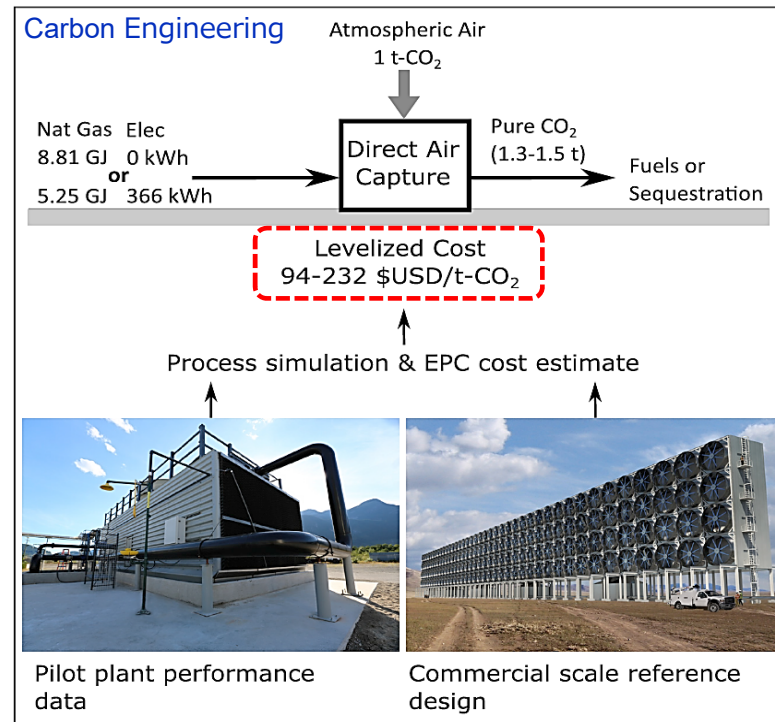
CO₂回収方法：CO₂がフィルター表面に科学的に堆積。CO₂堆積量が飽和したら、100℃程度の熱をかけてCO₂を分離回収。

プラントで集めたCO₂は、温室を運営する農業生産者や、炭酸飲料を製造する飲料会社、食品メーカーなどの販売。

今後は世界中で検討している地中に注入する処理と組み合わせても効率よく稼働するであろう。2025年までに世界中のCO₂の1%を回収することを目指している。そのためには、今回建設したようなプラントを25万カ所に設置する必要がある。

Climeworks社は、現在 1tonのCO₂を抽出するのに約 600ドル（約¥66,000）がかかっているが操業が増加するにつれて 5~10年後にはコストが 100ドル（約¥11,000）を下回る見込みである。

カナダ カルガリー大学 David Keith 教授



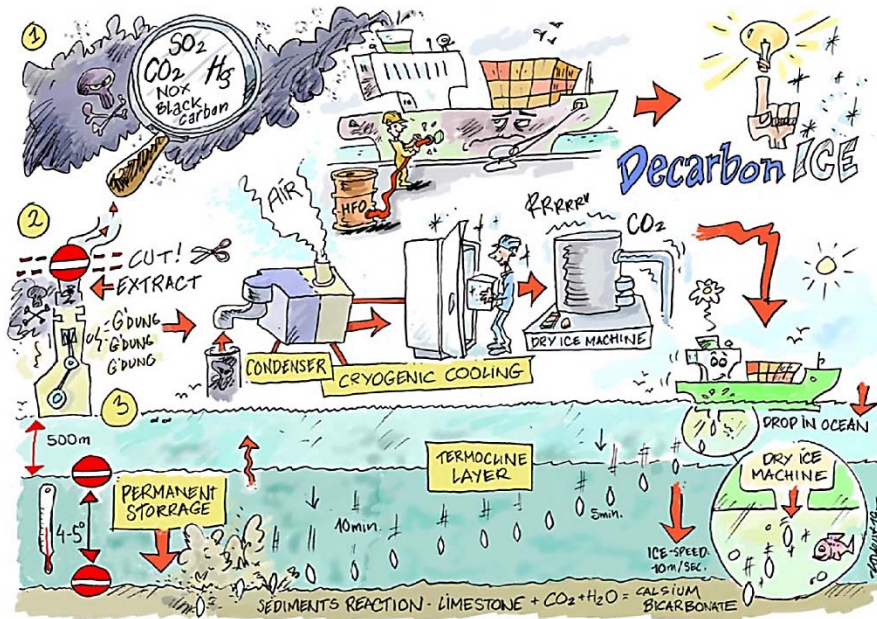
カーボン・エンジニアリングのプラントでは、空気を水酸化カルシウム溶液を含む塔に通すことでCO₂を酸化カルシウムに変化させ、その後のステップで炭酸カルシウムの塊にする。

炭酸カルシウムは加熱すると酸化カルシウムとCO₂に分離するので、CO₂だけを取り出して圧縮し、パイプラインを通して地下に埋めている。

将来的にはこのCO₂を利用して燃料の合成を計画。

参考比較：船上CCS MSB 昨年度試算（人工メタン燃料使用）⇒ CO₂回収 53~68 \$/ton-CO₂, CO₂液化 30~38 \$/ton-CO₂

CO2のドライアイス化、海中投棄・海底貯留



decarbonICE	2019				2020											
	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Project management and QA																
Communication and stakeholder management																
Cryogenic capture plant																
Ship integration																
- Newbuilding																
- Retrofit																
Chute system																
Descent analysis																
Sediment storage analysis																
- IMO presentations																
Cost and impact analysis																
- Capex																
- Opex																
Class notations and insurance clauses																
Safety and operation																
Steering committee																

既存技術に基づくソリューション

- DecarbonICE™技術は全く異なる革新的な代替手段で海洋の炭素回収貯蔵技術。
- 既存の船舶に後付けするだけでなく、新しい船舶にも適用。
- CO2も他GHGエミッションもドライアイス化して捕らえるため、各船舶に極低温プラントを追加搭載することで、現在の燃料と船舶設計の継続的な使用を可能にする。
- ドライアスを小さなブロックに形成。ブロックは航行中に海に放出し、海底に沈め、海底堆積物内にCO2を永久的に貯留する。
- DecarbonICE™ソリューションは、500メートルを超える水深での国際海運に適用可能であり、船ごとに80%オーダーでCO2の排出削減につながる。
- この技術のコストは、CO2 1トンあたり25ユーロ以下を目標。

プロジェクトプラットフォーム (MDC:海事開発センター)

共同産業プロジェクトプラットフォームを2019年9月に設立。主なプロジェクト目標は、脱炭素技術を2020年のセッション中にIMOに提示を目標。

- 技術ソリューション
- 規制と環境
- 操作
- 財務および外部への影響
- プロジェクト管理とアウトリーチ

業界パートナー

10～12の船会社サポート(@€50,000)

- Wartsila : CO2のドライアイス化貯蔵プラント設計
- DSME : 新造船へのプラント搭載・標準設計
- MAN : 既存船へのプラント・レトロフィット設計
- DNVGL & GARD : リスクアナリシス、Class Notations

The New MAN B&W ME-LGIP Engine

LGIP Technologies Confirmed at RCC - LGIP Injection Concept

Cylinder cover with LPG injection valve and gas block – same system to be used for NH₃

Valve control block:

- ELWI-valve (fuel pressurization)
- ELGI-valve (injection timing)
- Hydraulic accumulator
- Hydraulic and sealing oil connections

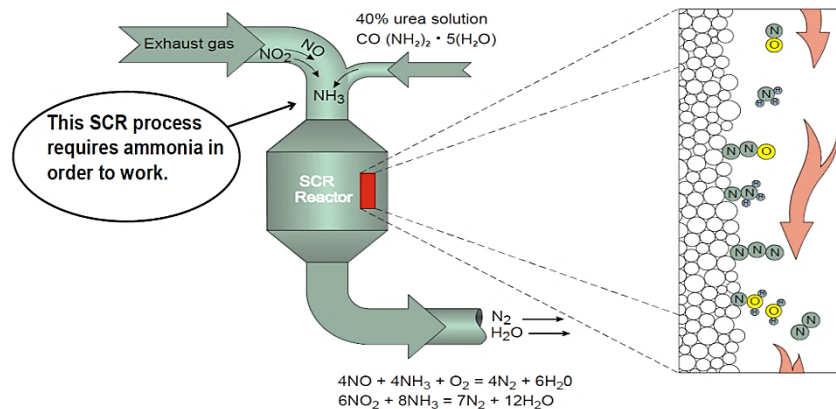
Double wall gas piping:

- LPG inlet
- LPG return



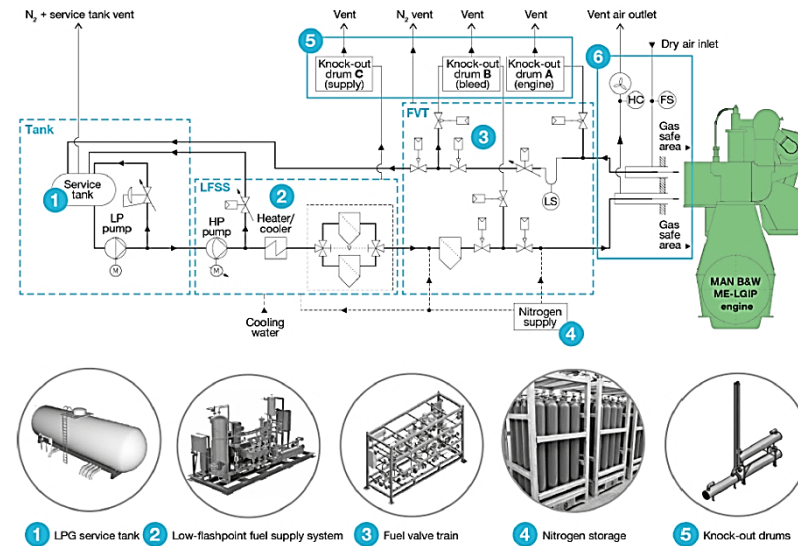
NOx emission – ammonia.

Selective Catalytic Reduction (SCR) Process – removing NOx emissions



The new MAN B&W ME-LGIP engine

This engine type can be modified to burn ammonia as well.



Conclusion

Propulsion solutions on short term:

- New fuels with lower CO₂ emission will be needed to meet EEDI
- To increase the efficiency; solutions like PTO, WHR will be more common

Propulsion solutions on long term:

- Two stroke engines will remain as the most dominating propulsion solution
- Carbon free produced methanol, ammonia, LNG and biofuels will be available
- All above fuel types can be burned in the 2-stroke ME-C, ME-GI or ME-LGI engine
- Efficiency above 60% incl. WHR & PTO

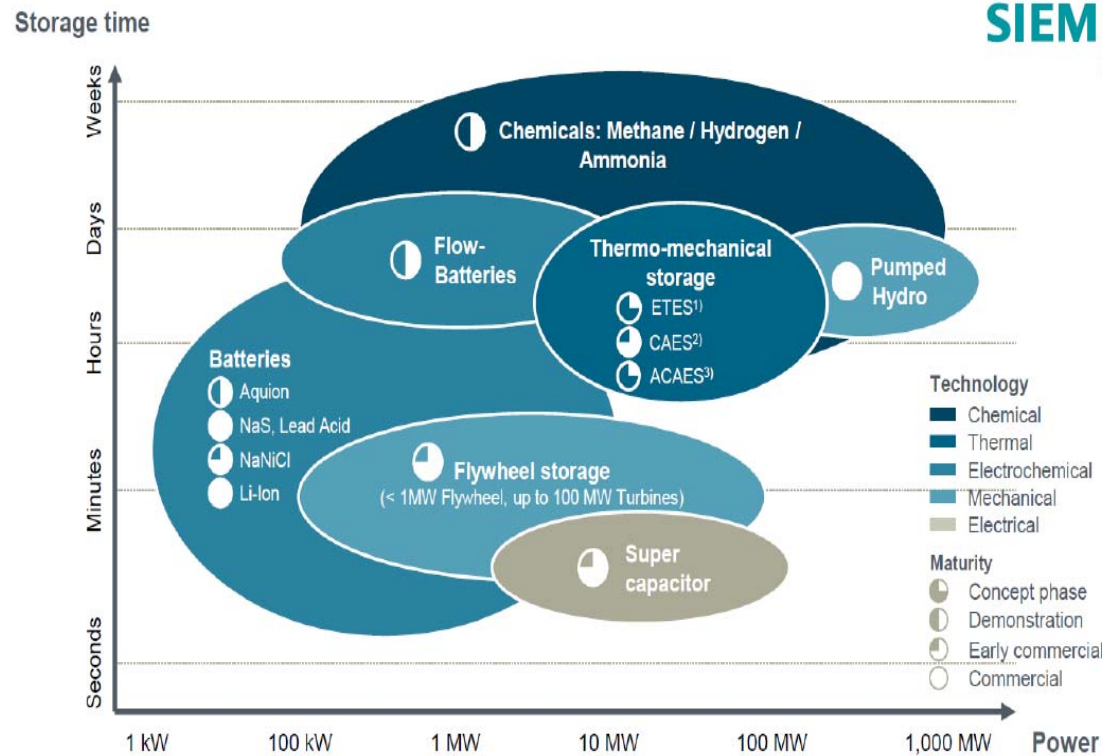
Development of an ammonia fuelled ME-LGI engine:

- History shows that ammonia works as an engine fuel.
- Engine development will be done when the market comes.
- Development time is estimated to 2-3 years.
- Development cost of an ammonia engine, estimated to 5 mill EUR.

MAN-SIEMENS

Ammonia, NH3 as green fuel produced with renewable energy

Ammonia is the logic option



¹ Electro-Thermal Energy Storage

² Compressed Air Energy Storage

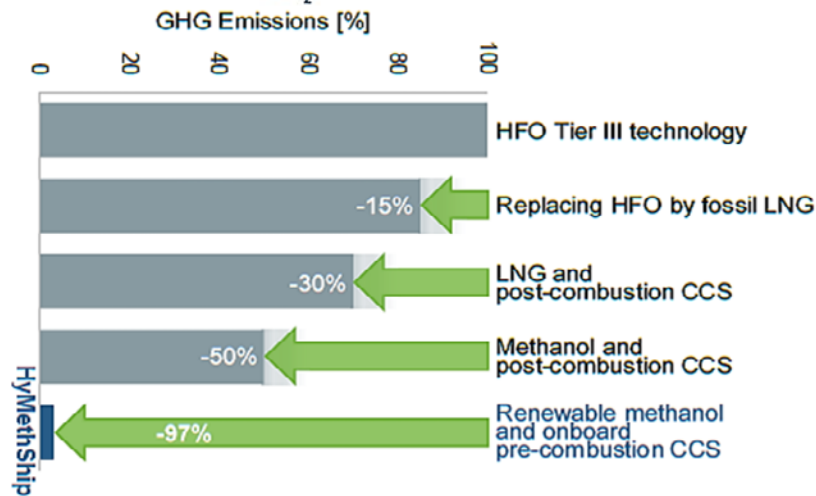
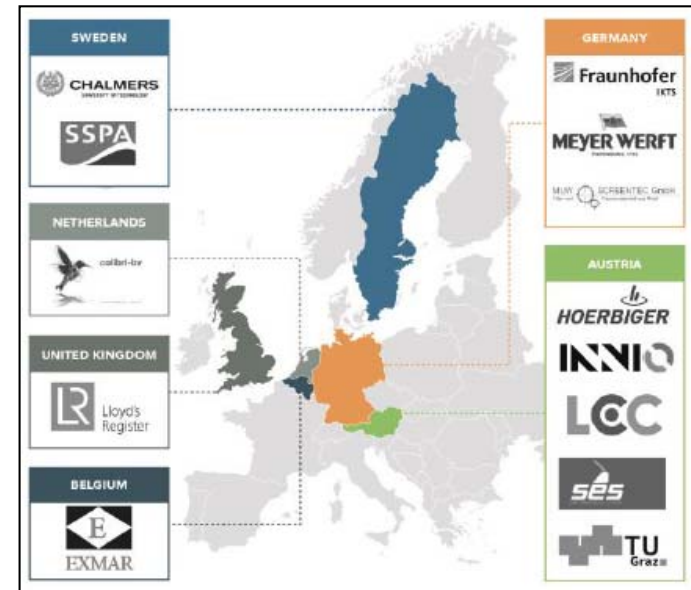
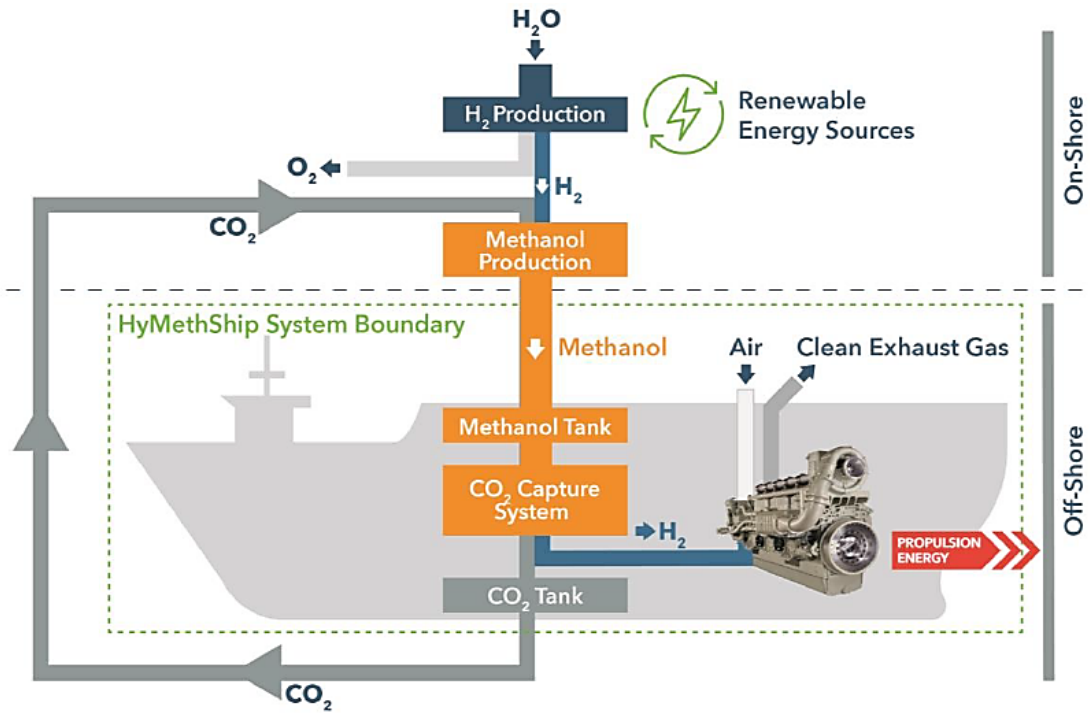
³ Adiabatic Compressed Air Energy Storage

Source: Ian Wilkinson, Siemens

NH3 advantages as green fuel:

- No carbon. Clean combustion without CO2 or carbon
- Can be produced 100% by electrical energy
- Can easily be reformed to H2 and N2
- Can be stored with high energy density at <20bar
- Low risk of fire. Relatively specific ratio of NH3 and air (15-25%) is required to sustain combustion

海外情報④ HyMethShip project (HORISON 2020 program)



The project started in 2018 and will run for 3 years.

The work is structured into 11 work packages that deal with the pre-combustion carbon capture system and the internal combustion engine as well as assess safety, economic and environmental factors and system integration. The consortium consists of 13 partners including a globally operating shipping company, a major shipyard, a ship classification society, research institutes and universities and equipment manufacturers.

The publication will present the structure of the work and preliminary results of the project.

The project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No 768945



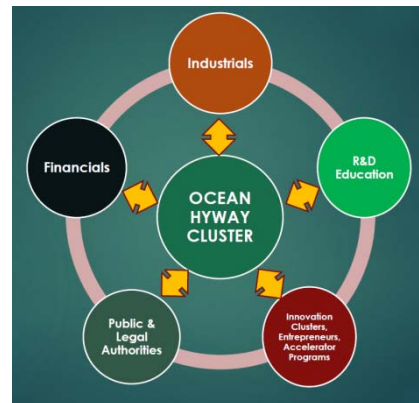
Use of hydrogen in maritime sector in Norway – pilot cases and establishment of the hydrogen maritime consortium

Trond Strømgren
Senior Advisor Renewable Energy and Hydrogen Value Chain

26.02.2019

OHC - Mission

- ▶ At the forefront in commercializing effective and climate friendly hydrogen technology solutions
 - Exploiting sustainable growth opportunities
 - Strengthening competitive advantage
 - Pursuing market leadership
- ▶ Radical innovation through cutting edge collaboration across company, sector and country borders
- ▶ Accessing the best resources and skills throughout the entire value chain

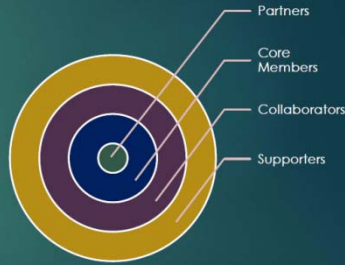


Focus Area for Collaboration

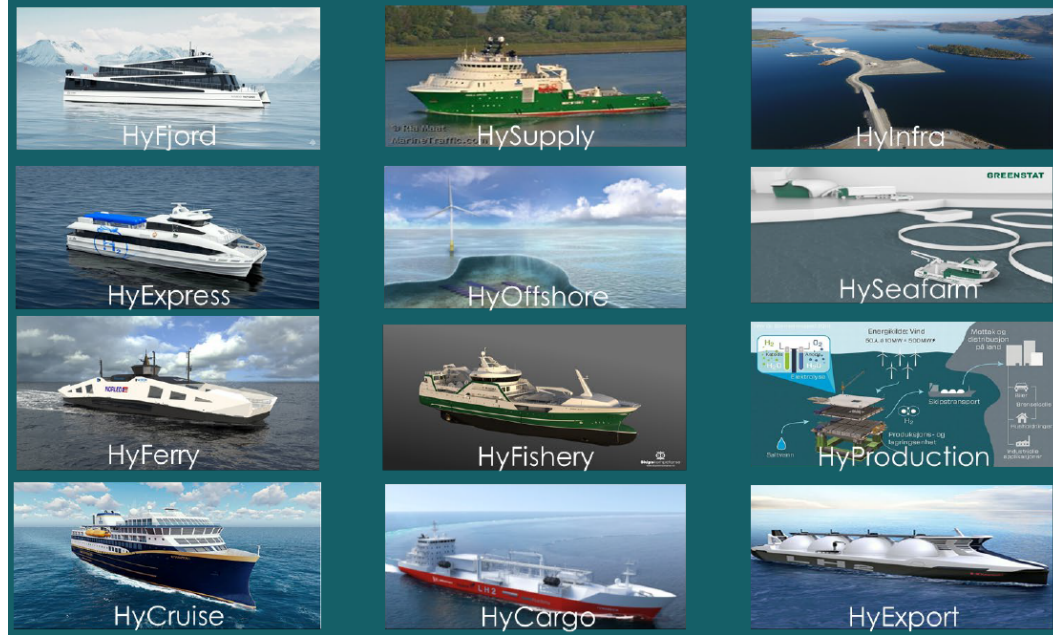
Focus Area	Purpose	Measures
HyCOM	Member recruitment, relationship building, visibility, PR	Meeting places, workshops, conferences, sales
HyR&D	Stimulating R&D and increased cooperation between the players	Task Forums, R&D projects, workshops, application for funding
HyED	Hydrogen technology education programs for future labor	Develop courses & programs in cooperation with educational institutions, student meeting areas, professional exercises
HyInternational	Stimulate increased export of hydrogen and related goods and services	International conferences, networking, project collaboration, on site corporate visits
Hyfinance	Develop and exploit funding models and financial competence	Networking towards financial stakeholders, project funding, early participation
HyBusiness	Securing goal-achieving and ownership of strategy	Annual update of strategy and goals, risk and barrier analysis
HyManagement	Ensure targeted and professional cluster management	Recruiting skills, smart specialization, project management, common features

OHC - Participation

- ▶ **Partners**
Stakeholder companies who define themselves to be in the centre of the mission and who are taking on a bigger responsibility in developing the Cluster
- ▶ **Core Members**
Corporates who share our ambition and acknowledging the need for collaboration across sectors and boards to succeed in the market
- ▶ **Collaborators**
Companies that cooperate on defined areas or projects
- ▶ **Supporters**
Cheerleaders and supporters from all parts of the society who actively support our mission



Ocean Hyway Markets



海外情報⑥ Hydrogen project within CMB (Belgium)



CMB (Compagnie Maritime Belge) owns/operates 90 ships

- CMB is a maritime group with its registered office in Antwerp and was founded in 1895.
- The group consists of 4 divisions:
 - Bocimar: active in dry bulk shipping
 - Delphis: container fleet, mainly ice classed
 - Bochem: chemical tanker fleet
 - CMB Technologies



<https://www.youtube.com/watch?v=hkfxWEMQE4o>

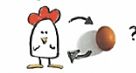


CMB Technologies

Non public version - © 2019 - CMB nv



Before 'zero emission technology' can be used widely, one needs a 'low emission technology' as kick starter



- Zero emission applications require innovations at 3 domains:
 - Hydrogen supply: H₂ purity of 99,995% is required. Also the refuelling/bunkering station must be operational (in reality only 70-98% uptime)
 - Proven H₂ storage system: large enough to have a realistic autonomy with some backup fuel quantity
 - Hydrogen Fuel Cell: FCs are still novel technology and are not yet proven in the demanding transport industry (salt, dust, degradation & lifetime issues)
- Innovation on 3 domains implies risks, which restrain fleet owners to invest massively in this technology. A dual fuel combustion technology can mitigate these risks.
- Dual fuel technology is the transition technology enabling the H₂ supply and the H₂ storage technology to mature and to create a market for hydrogen as a fuel.
- Dual fuel hydrogen diesel combustion engines are a low carbon technology. Without hardware modifications to the engine (so only software tuning for the hydrogen combustion), reductions of 65% up to 85% can be achieved.

CMB Technologies

Non public version - © 2019 - CMB nv



Combustion engines are the cheapest way to convert hydrogen into power and heat

	\$/kW	Durability (h)	Weight/power ratio (kg/kW)	Efficiency
Medium speed 1MW combustion engine	350	150,000	10,7	45%
High speed 0.4-0.7MW combustion engine	100	24,000	2,4	42%
Fuel cell (PEM)	1000	10,000	4	50%
Fuel cell (SO)	4500	50,000	50	50%

Combustion engines produce torque which can power wheels or propeller directly. Fuel cells produce electricity which requires expensive/heavy power equipment to convert it into mechanical power, which reduce the total efficiency.

Fuel Cell Power Electronics DC/DC converter Battery for ramp up power Electric motor

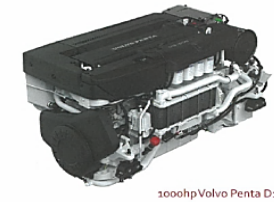
CMB Technologies

Non public version - © 2019 - CMB nv

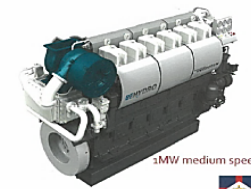


2 new types of hydrogen engines are currently being developed

- Volvo Penta D13-1000hp (2300RPM):**
 - Suitable for crew transfer vessels, patrol boats, gensets, trucks, heavy duty (mining) vehicles, etc.
 - D13 has a yearly production volume of 85.000 pieces and has the newest injection technology with a twin turbo and steel pistons.
- Medium speed engine (1000RPM):
 - Joint Venture between ABC Engines and CMB;
 - Due to low rotation speed, high efficiency is obtained;
 - Lifetime of >150.000h with low maintenance cost;
 - Power range of 0,8-3MW (L6 → V16);
 - Available as dual fuel as well as mono fuel;
 - NO_x of mono fuel less than 1/10th of IMO Tier III.



1000hp Volvo Penta D13



1MW medium speed

CMB Technologies

Non public version - © 2019 - CMB nv



2 Hydrogen medium speeds engines will be built inside a container to test the technology

- The dual fuel (hydrogen – diesel) as well as the mono fuel hydrogen engine will be built inside a container as a genset for easy testing
- The engines have already been tested during 3 test sessions at a research institute (WTZ)



Container housing 1MW medium speed genset



Mono cylinder test cell

CMB Technologies

Non public version - © 2019 - CMB nv

Hydroville: Hydrogen Powered Catamaran (hi-speed with non-planing hull)

DESIGN SPECIFICATIONS

Length	16 m
# of Engines	16
Beam	4,2 m
Max Fuel	400 m³
Displacement at Full Load	120 t
Submerged	120 t
Propulsion	2x Dual Fuel Diesel and hydrogen internal combustion engines (DCEC) with a total shaft power of 1000 kW
Fuel	16 hydrogen tanks (200 liter) @ 200 bar and 16 hydrogen tanks (400 liter) @ 200 bar
Max speed	18 knots
Class certification	214
	100% hydrogen (100% Diesel) engine
	50% hydrogen / 50% Diesel engine
	100% Diesel engine

REQUIREMENTS IN TESTS

Displacement	120 t
Weight	120 t
Max shaft power	1000 kW
Max torque	1000 Nm
Max fuel consumption	1000 l/h
Max speed	18 knots
Max acceleration	0,5 g
Max deceleration	0,5 g
Max vibration	0,5 g
Max noise	100 dB
Max fuel consumption	1000 l/h
Max speed	18 knots
Max acceleration	0,5 g
Max deceleration	0,5 g
Max vibration	0,5 g
Max noise	100 dB

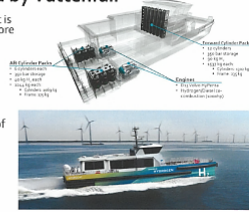
CMB Technologies

Non public version - © 2019 - CMB nv



A Hydrocat is developed in cooperation with Windcat workboats and will be used by Vattenfall

- Based on Hydroville technology, a Hydrocat is being developed to be operated at an offshore wind park.
- Design is based on the proven and efficient Windcat MK3-S.
- Dual fuel capability diesel – hydrogen.
- The hydrogen storage is distributed over 3 locations.
- Daily hydrogen refuelling of 170kg (=581 of diesel) saving 1.6ton of CO₂ a day.
- 2000hp in total pushing the vessel for +30 knots full speed.
- 13,3t bollard pull + 2x 4,5t wind grip.
- The Hydrocat is expected to sail mid 2020.



CMB Technologies

Non public version - © 2019 - CMB nv



MOVE THE WORLD FORWARD

**MITSUBISHI
HEAVY
INDUSTRIES
GROUP**