

2024/2/5
深海探査システム委員会（第3回）

AUVに関する研究動向 + α

巻 俊宏

東京大学生産技術研究所
海中観測実装工学研究センター
<http://makilab.iis.u-tokyo.ac.jp/>
maki@iis.u-tokyo.ac.jp

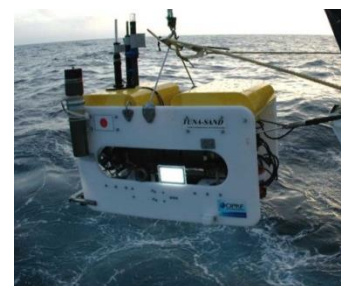
自律型海中ロボット (AUV)

- テザーケーブル無し
- 全自動
- 利点
 - 自由かつ安定した動き
 - 広い活動範囲
 - 観測効率
 - 将来の可能性
- 欠点
 - 限られた通信・エネルギー
 - 予期せぬ事態への対応
 - 喪失リスク

	Cruise / クルーズ型	Hovering / ホバリング型	Glider / グライダー型
形状・特徴	細長い胴体で後部に主推進器を持つ。魚雷形。	前進のみでなく、上下や横方向にも推進器を持つ。その場停止（ホバリング）できる。	プロペラによる推進器を持たず、本体の浮力変化により移動する。
利点	推進効率に優れるため、広範囲の観測に向く	複雑な動きができるため海底や構造物付近での調査に向く	消費電力が非常に小さいため、長距離・長期の観測に向く
適用事例	深浅測量、資源探査、水質調査	海底や人工物の詳細観測、画像マッピング	水質調査
航続距離	O(100km)	O(10km)	O(1000km)
例	うらしま Remus r2D4	Nereus HROV Tuna-Sand	Spray Sea glider



REMUS 6000 (USA)



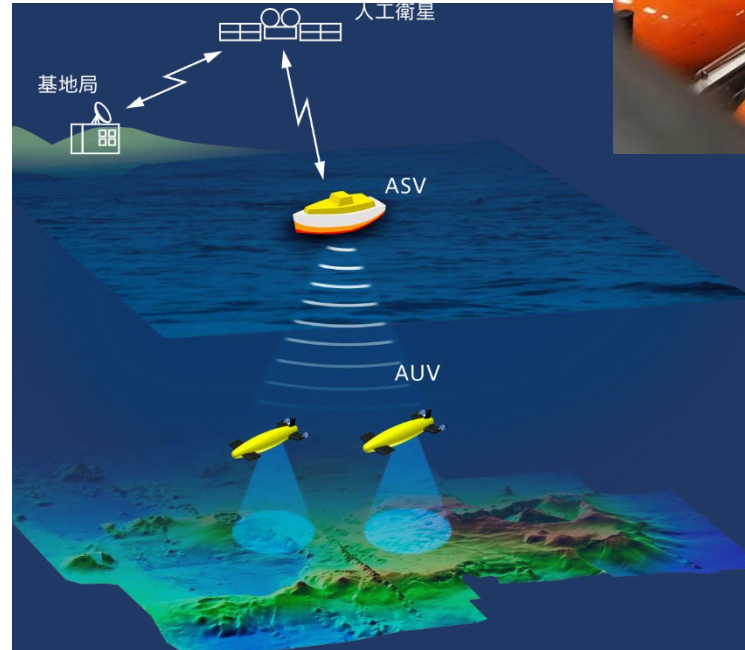
Tuna-Sand (Japan)



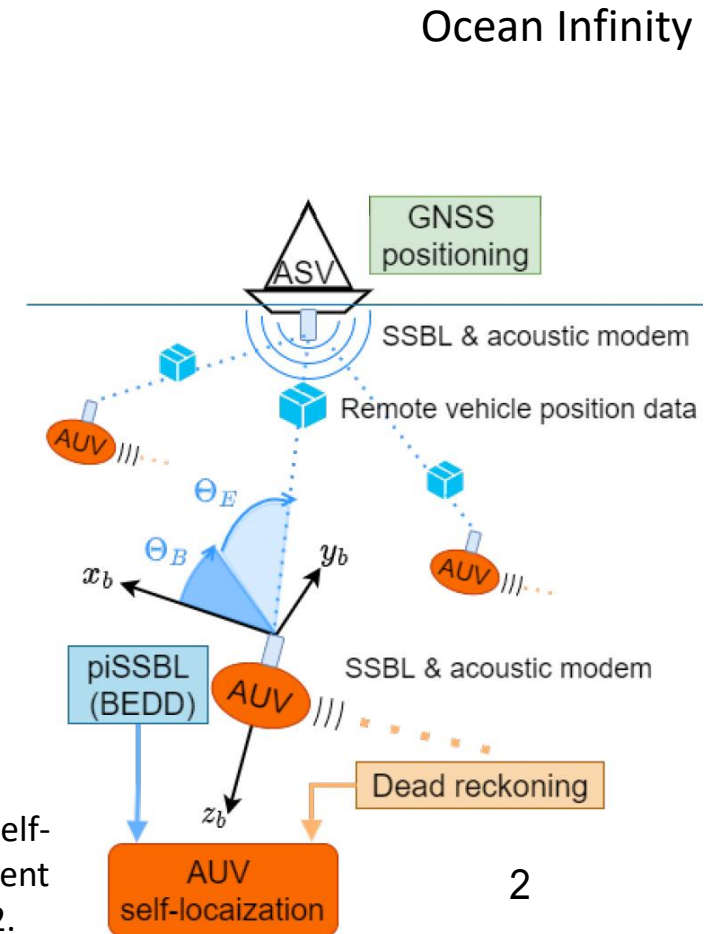
Slocum (USA)

マルチビークル

- 複数のAUVを同時に運用する技術
- 広域の効率的な探査を実現する
- シップタイムの有効活用
 - Force Multiplier
- ASVとの連携により母船レスでの運用が可能になる
 - Carbon Neutral
- キーテクノロジー
 - スケーラブルな測位
 - 隊列制御
 - 着揚収
 - 通信
 - 信頼できるハード・ソフト
 - 大量のデータの処理方法



Team KUROSHIO



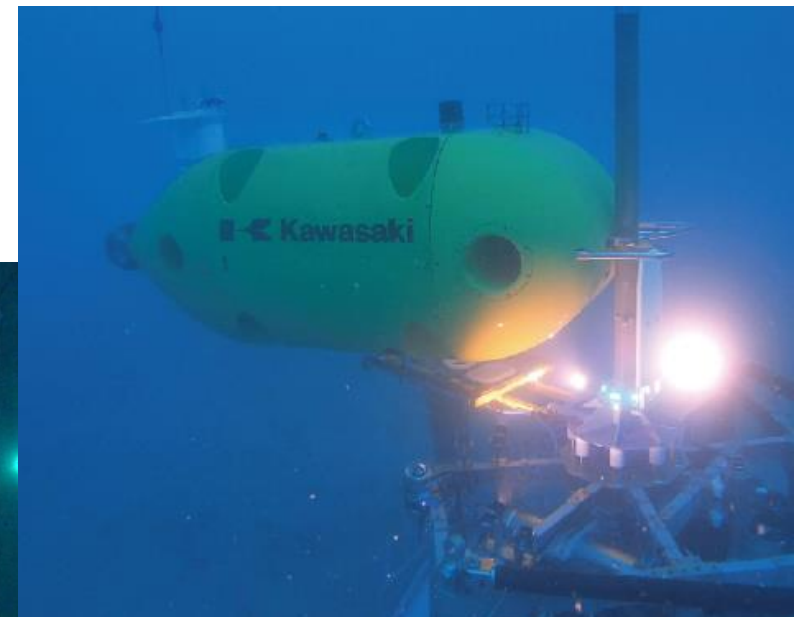
Sekimori Y., et al., Acoustic Passive BEDD Self-localization for a Fleet of AUVs: A Sea Experiment Validation, OCEANS 2022 Hampton Roads, 2022.

レジデント

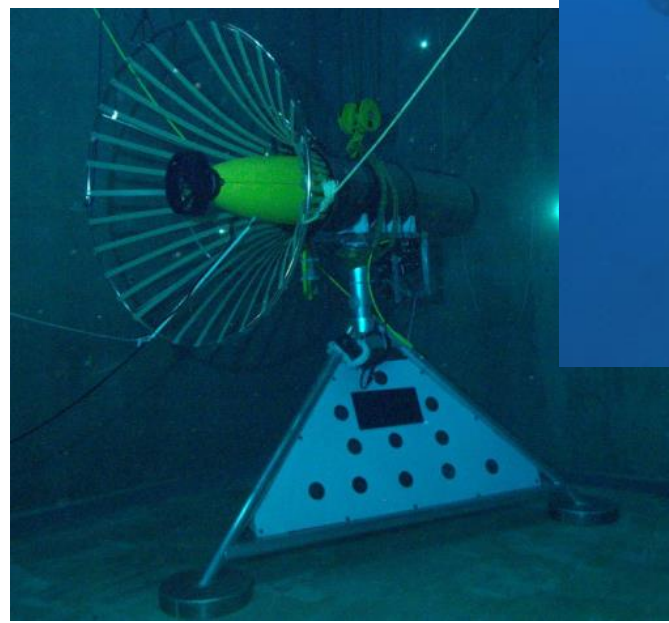
- 海底ステーションを基地とすることで、ROVやAUVを海中に長期展開する技術
- 母船レス・長期運用のための基盤技術
- 母船を使う場合も有効
- コンセプトは昔からあるが、技術の進化により実現性が出てきた。
- キーテクノロジー
 - ドッキング
 - 非接触充電
 - 通信
 - 長期間の安定動作（地味だが重要）



ISE



第2期SIP



MBARI

低コスト

- 低コストかつ小型のセンサ、プラットフォームが続々登場
 - (空の) ドローン技術の進化、オープンソースのソフトウェア・ハードウェアの普及が背景
 - 価格としては従来の1/10程度か
- 小型軽量なので運用コストも削減できる
 - 特にクレーンが不要になるとメリット大
- AUVは亡失のリスクをゼロにできないため、普及のためには本体の低コスト化が重要
- 低コストなセンサの能力は限られる → ソフトウェアが重要



<https://www.blueprintsubsea.com/>



www.waterlinked.com



<https://bluerobotics.com/>



<https://www.qysea.com/>

単体の機能強化

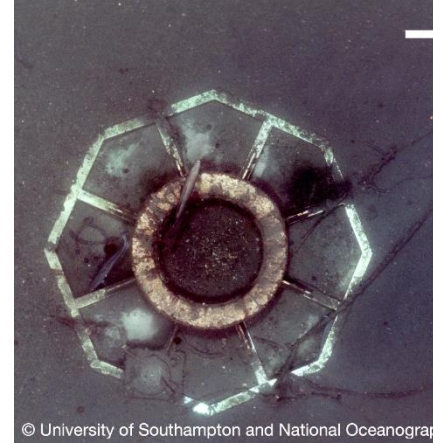
- より遠くへ
- より賢く
- より高精度に
- より厳しい環境へ



CUREE WHOI, USA

画像によるナビゲーションや生物トラッキング

<https://warp.whoi.edu/curee/>



© University of Southampton and National Oceanograph

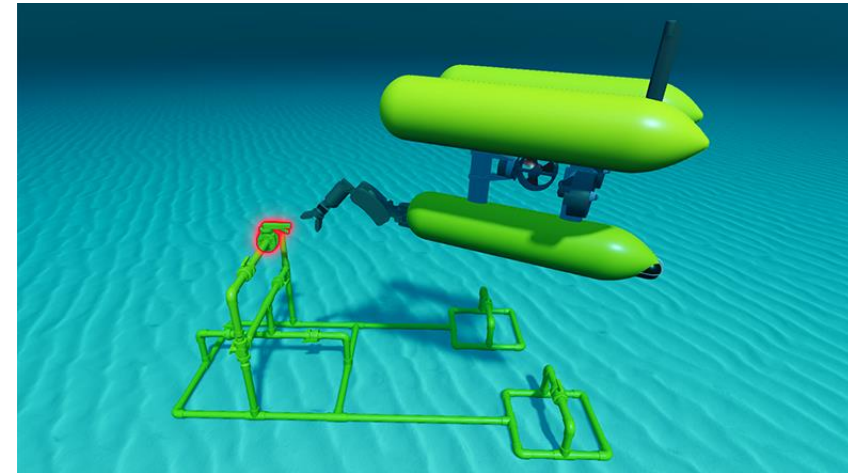


Boaty McBoatface

NOC, Southampton Univ., UK

20日、1000kmに及ぶ母船レス運用、高精度画像マッピング

<https://www.southampton.ac.uk/news/2022/11/biocam-atsea-mission.page>



Girona 500 Girona Univ. of Girona, Spain

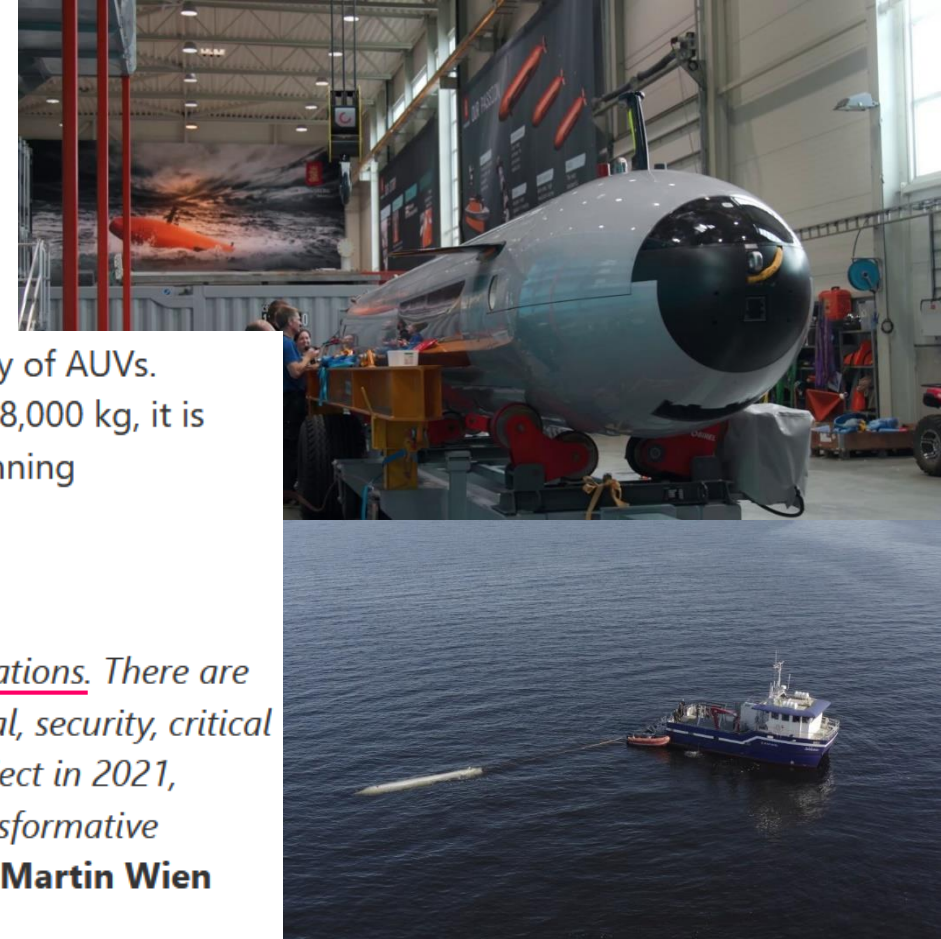
インターベンション

<https://cirs.udg.edu/doctoral-thesis-automated-3d-object-recognition-in-underwater-scenarios-for-manipulation/>

Kongsberg Discovery Sets New AUV Milestone with Successful Sea Trials of HUGIN Endurance

2023/10/26

Horten, Norway: Kongsberg Discovery has started an extensive programme of sea trials with its new and revolutionary long-range Autonomous Underwater Vehicle (AUV), the HUGIN Endurance.



HUGIN Endurance, launched in 2021, is the largest member of Kongsberg Discovery's HUGIN family of AUVs. Measuring approximately 11 metres in length, with a diameter of 1.2 metres and weighing around 8,000 kg, it is rated to a depth of 6,000 metres and designed to facilitate independent multi-role operations spanning approximately 2,200km or 1,200 nautical miles.

Making the impossible possible

"With HUGIN Endurance we are pushing the boundaries for autonomous over-the-horizon AUV operations. There are countless possible underwater applications, including geophysical, environmental, hydrographic, naval, security, critical asset inspection and search-and-rescue operations. Although we only launched the development project in 2021, thanks to our more than 30 years of experience in AUV technology we've been able to develop a transformative product within a very short time. To see it in the water, responding as expected, is very exciting," **says Martin Wien Fjell, President Kongsberg Discovery.**

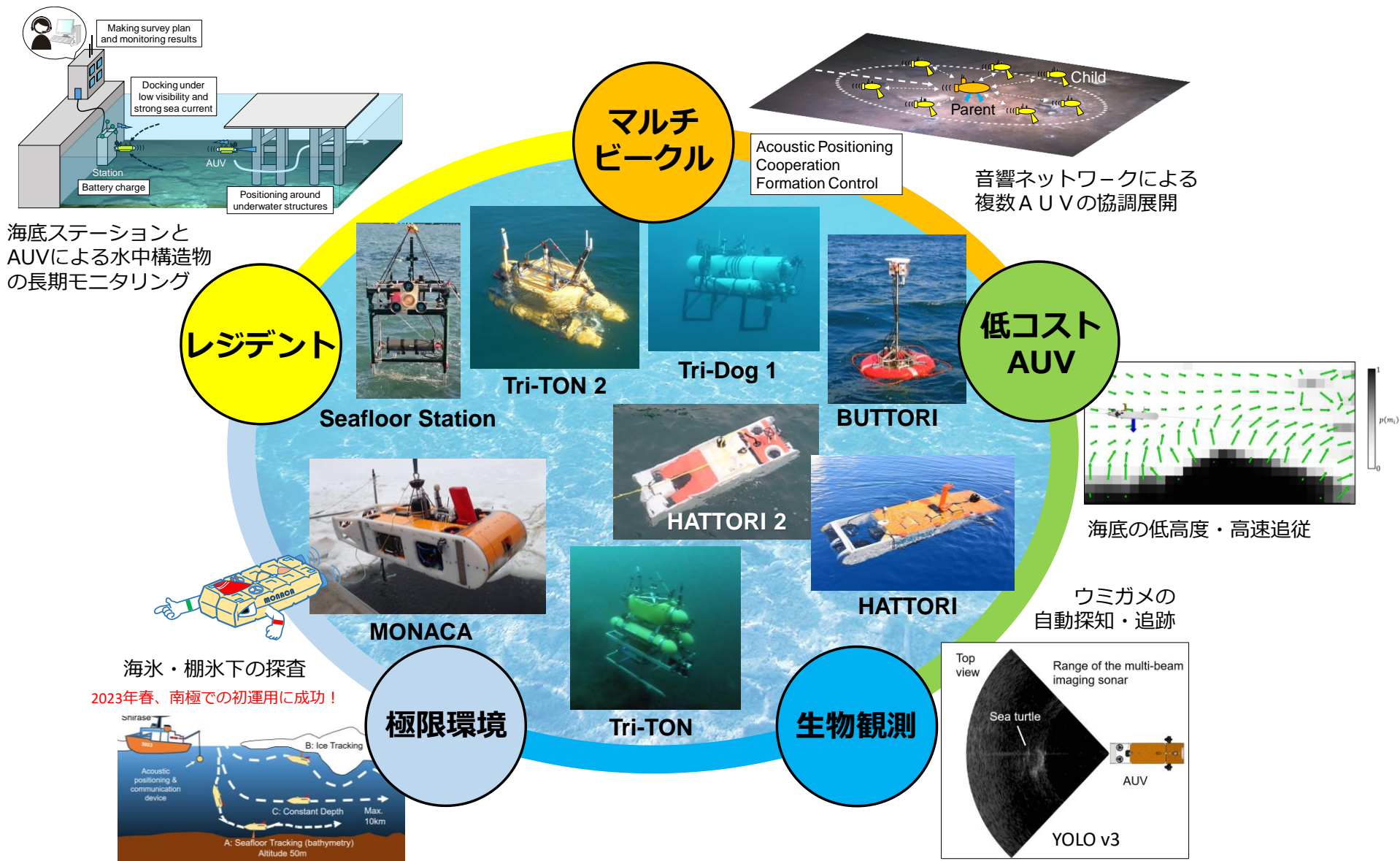
A world first in shore-to-shore operations

Powered by pressure-tolerant lithium batteries, the unit's biggest differentiator is that it can be deployed directly from shore and spend up to 15 days at sea

"The name Endurance says it all. Its long-range capability represents a huge cost benefit, with no mother ship required for launching, monitoring and recharging. For customers, being able to carry out unsupervised operations far from any support infrastructure, both reduces project costs and carbon footprint while significantly increasing the weather window," **says Fjell.** *"And even if a support ship is available or required, it can be assigned to other productive tasks while the HUGIN Endurance is on mission."*

<https://oceanroboticsplanet.com/kongsberg-discovery-sets-new-auv-milestone-with-successful-sea-trials-of-hugin-endurance-26-10-2023>

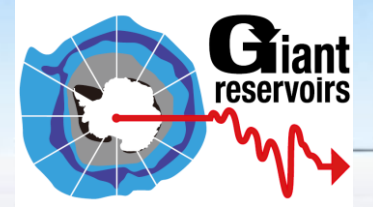
巻研究室における取り組み：海 × 自律ロボット



AUV MONACA

2023.1 南極での初運用に成功！

GRAntarctic <http://grantarctic.jp/>



https://news.tv-asahi.co.jp/news_society/articles/000286181.html

AUVによる 南極探査事例



Autosub Long Range (UK)
2018



Autosub 3 (UK)
2005



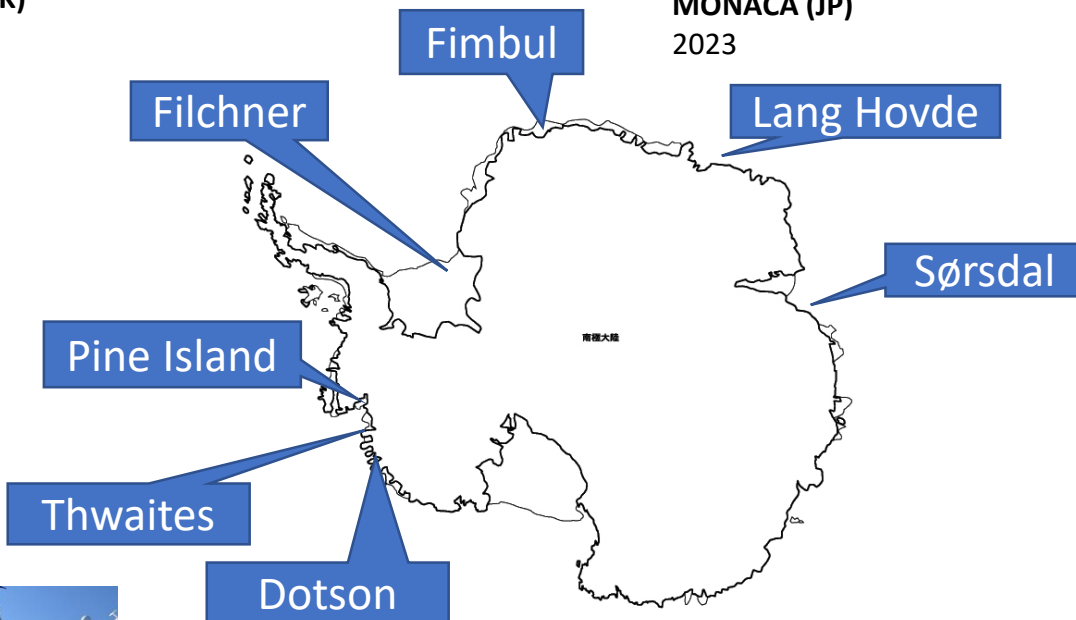
MONACA (JP)
2023



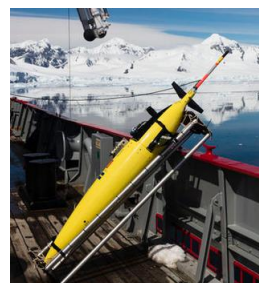
nupiri muka (AU)
ISE Explorer
2019



Autosub 3 (UK)
2009



Ran (SE)
Kongsberg HUGIN
2019



(no name?) (US)
Hydroid SeaGlider
2018

Sea Ice

Autosub 2 (UK)
2001

Jaguar (US) 9
2010, 2012 (various sites)

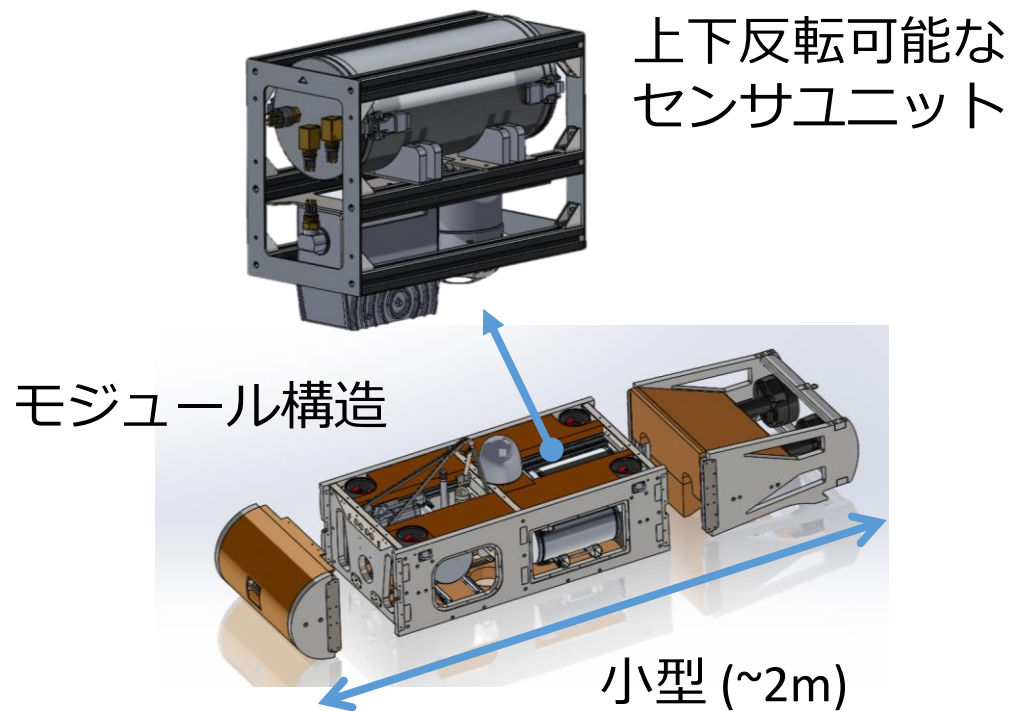
共同観測 (UK, SE, AU/KR)
2021-22

設計コンセプト

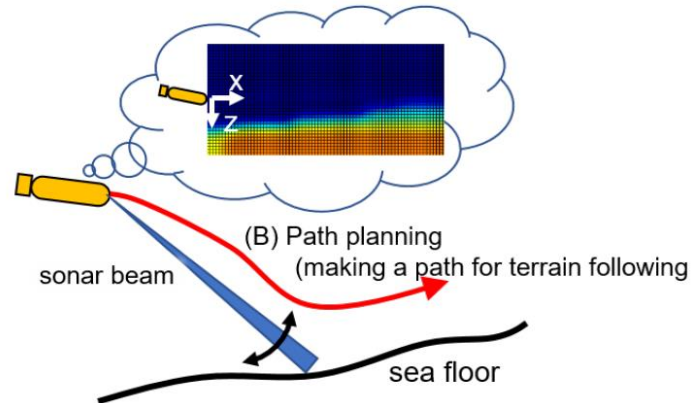
- 小型
 - 運用しやすい
 - しらせから着揚収可能
 - 低コスト
- モジュール構造
 - 多様な観測に対応
 - 分解して運搬可能
 - メンテナンスが容易
- 複雑地形の低高度追従に対応
 - ホバリング型
 - スキャニングソナーによる手法*, **
 - 海氷、棚氷、海底の画像観測にも対応 (将来)

* T. Maki, et al., Low-altitude and High-speed Terrain Tracking Method for Lightweight AUVs, Journal of Robotics and Mechatronics, 30(6), 971-979 (2018)

**小知井秀馬, 山縣広和, 巻俊宏, AUVによる極域探査のための複雑地形の追従手法 - シミュレーションによる性能評価-, 令和3年度 日本船舶海洋工学会 秋季講演会, (2021)



(A) Environment estimation
(making obstacle potential map P)



提案：コネクテッドROV

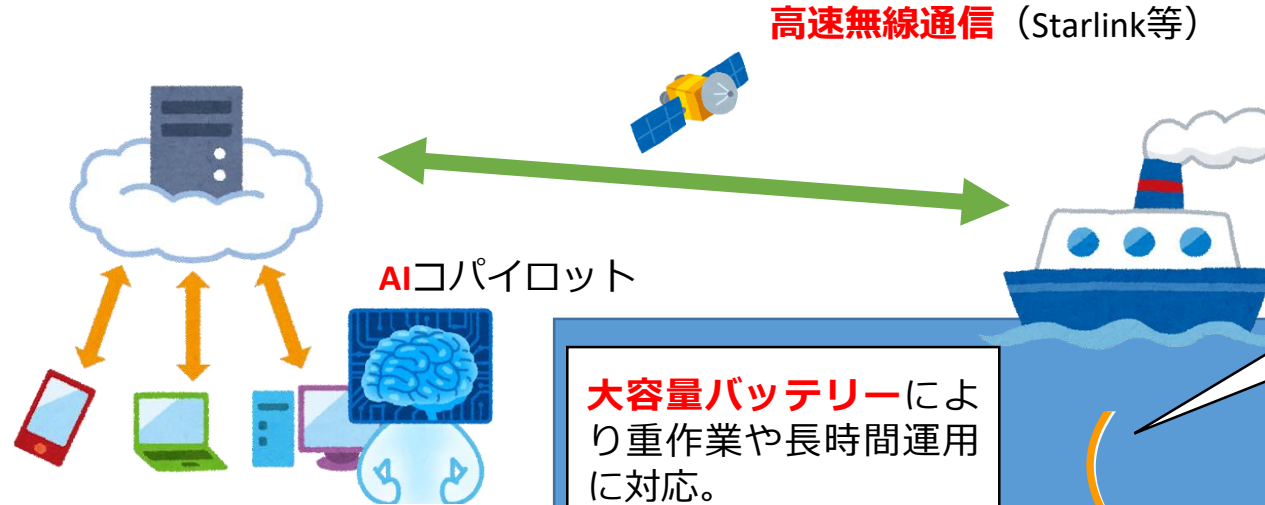
8000m級の探査能力を備える場合、少なくともROVは必須（AUVではサンプリング能力が不足。HOVを作る場合もレスキュー用に必要）。しかしケーブルの問題があり従来方式の開発は困難。一方でEV, 通信, メディア関連技術の発展は目覚ましく、これらの新技術との融合により新たな深海探査システムを実現できないか。



<https://oceaninfinity.com/>

オペレーター

熟練したROVオペレーターは希少な人材。場所の制約を無くして活躍の機会を最大化。人数制限もなくなるため交代制での24時間運用も可能に。働き方改革。



細径ケーブルにより製造上の問題をクリア。流れの影響を低減。交換も低コスト。

大容量バッテリーにより重作業や長時間運用に対応。最新EVのバッテリー容量はしんかい6500に迫る（テスラ 82kWh）。全固体電池など更なる技術革新も見込まれる。これらを均圧方式にできないか。

サンプルエレベータにより高効率&大量のサンプリングを実現。エレベータで電池を届け、深海で交換できればより長期運用も視野に。

文部科学省「第3回 深海探査システム委員会」

当社AUV「SPICE」の開発状況 並びに各深海探査システム国産化に向けた考察

2024年2月5日

川崎重工業株式会社

エネルギーソリューション&マリンカンパニー 船舶海洋ディビジョン
エグゼクティブフェロー（潜水艦・AUV関連技術担当）

湯浅 鉄二

カワる、
サキへ。

Changing forward

1. AUV「SPICE」開発状況
2. ROVの現状
3. 有人潜水船開発にむけて

1. AUV「SPICE」開発状況

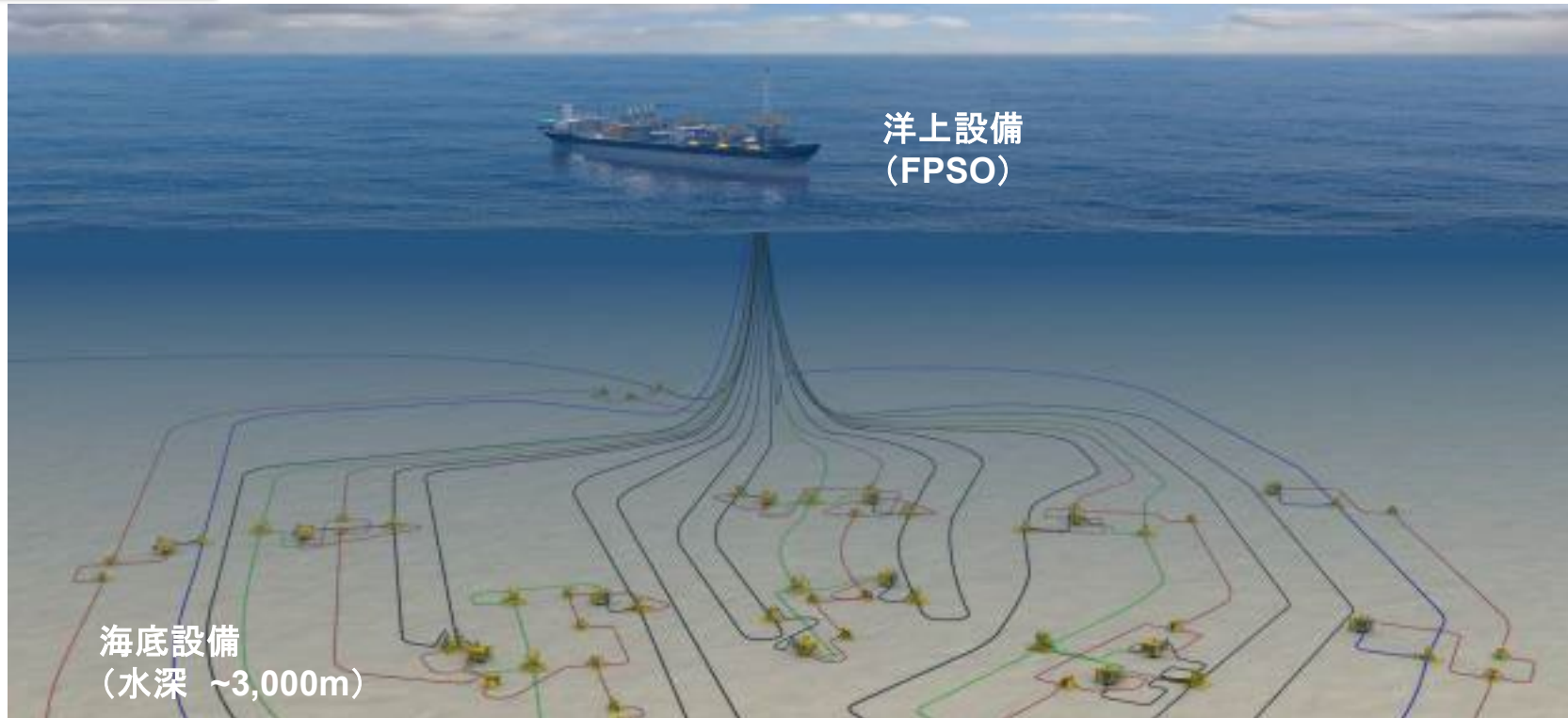
考察

- AUV(自律型無人潜水機)は、我が国でもJAMSTEC殿、海技研殿他が保有しており、主に海洋調査用として運用されている。
- 6000m級深海用AUVも、外国では“Hugin”“REMUS”“SeaRaptor”等が調査用として市販されており、我が国でもJAMSTEC殿が8000m級を目指して「うらしま」を改造中である。
- 海洋調査用AUVは、国内メーカーや大学等も取り組み、複数台の隊列制御や氷海域での運用等、研究が進んでおり、大深度用も含め総合海洋政策本部でのAUV戦略決定もあり、今後伸びていくであろう。
- 上記政府戦略もあり、今後AI等の最新技術を取り入れ研究開発を怠ることなく、国産化を推し進めていくべきと考える。
- 本項では当社が開発中の作業用AUV「SPICE」を紹介する。

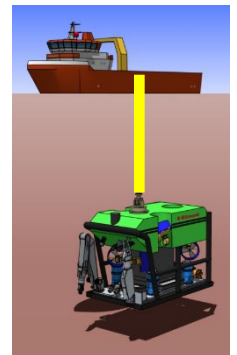
1. AUV「SPICE」開発状況

弊社AUV開発目標

海底油田設備での作業型AUV



ROV:遠隔操作型無人潜水機
(Remotely Operated Vehicle)

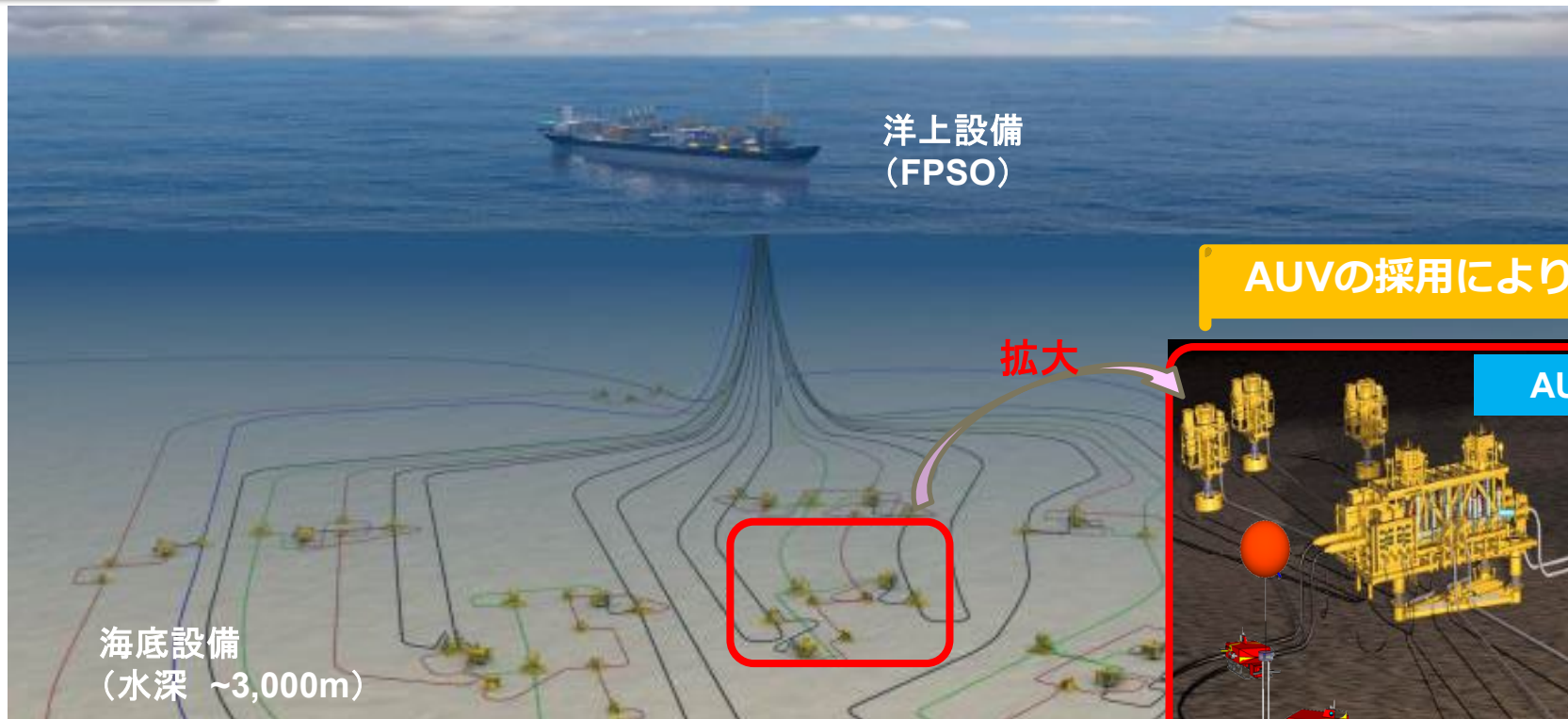


- ・ 石油・ガス分野では、機器・設備の検査・メンテナンス等は、ダイバーやROVが実施。
- ・ 設備廃棄やその環境調査を実施することが深刻な課題となりつつある。
- ・ 更に、これらは現状では非常にコストがかかるものとなっている。

1. AUV「SPICE」開発状況

弊社AUV開発目標

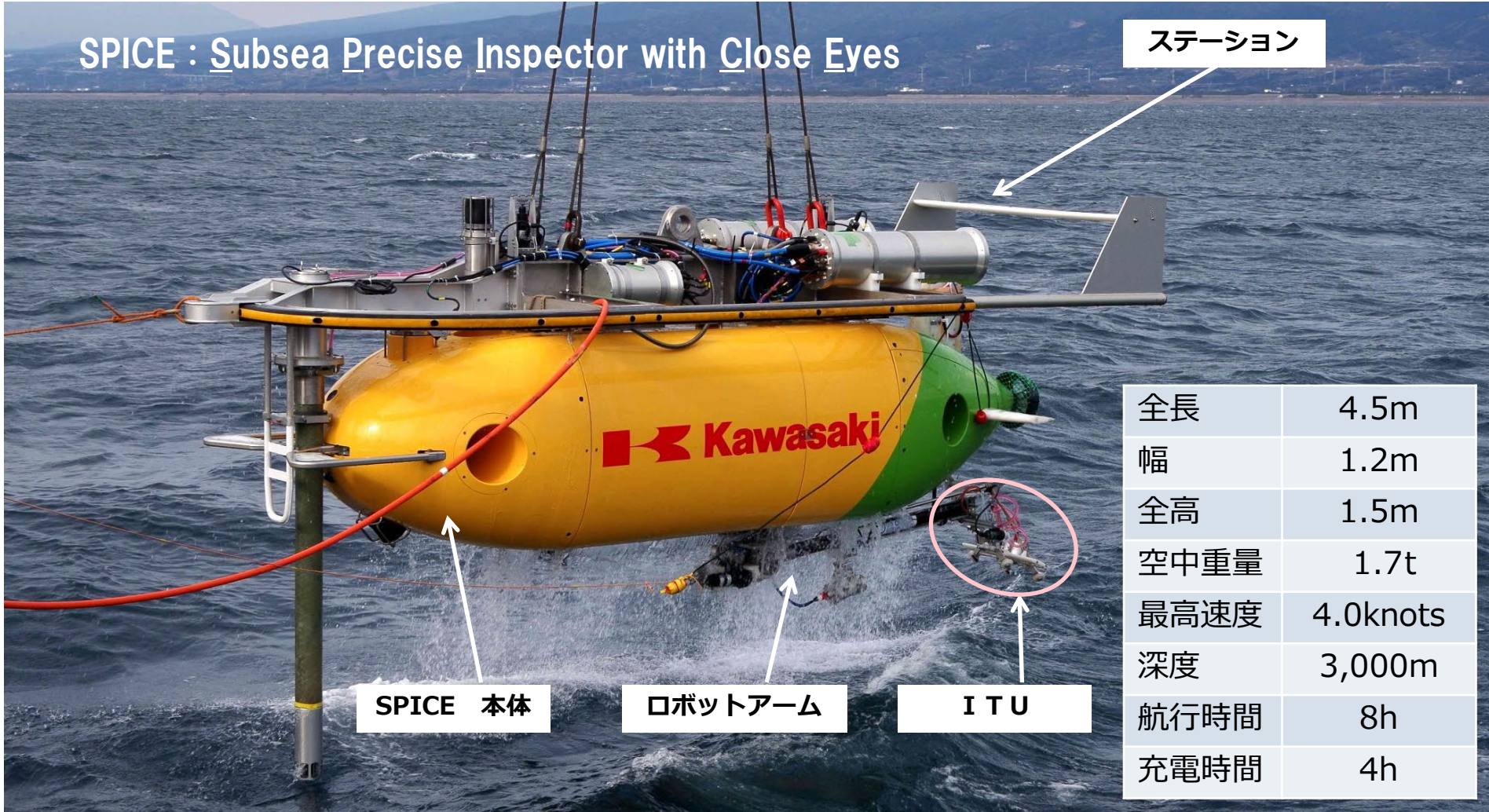
海底油田設備での作業型AUV



- ・ 石油・ガス分野では、機器・設備の検査・メンテナンス等は
- ・ 設備廃棄やその環境調査を実施することが深刻な課題とな
- ・ 更に、これらは現状では非常にコストがかかるものとなって

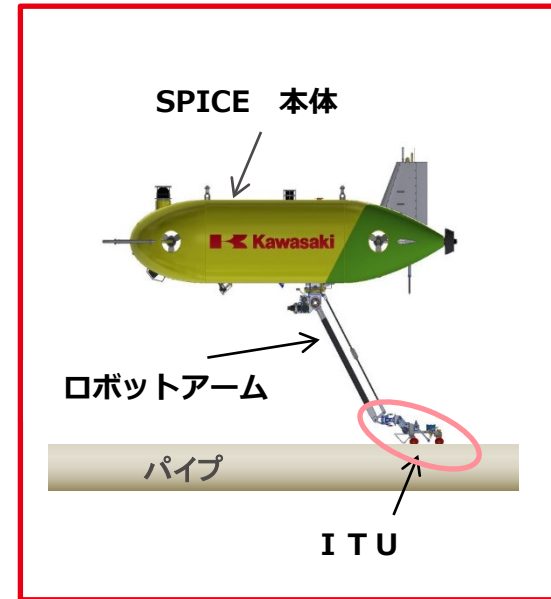
1. AUV「SPICE」開発状況

SPICE : Subsea Precise Inspector with Close Eyes



全長	4.5m
幅	1.2m
全高	1.5m
空中重量	1.7t
最高速度	4.0knots
深度	3,000m
航行時間	8h
充電時間	4h

「SPICE」イラスト



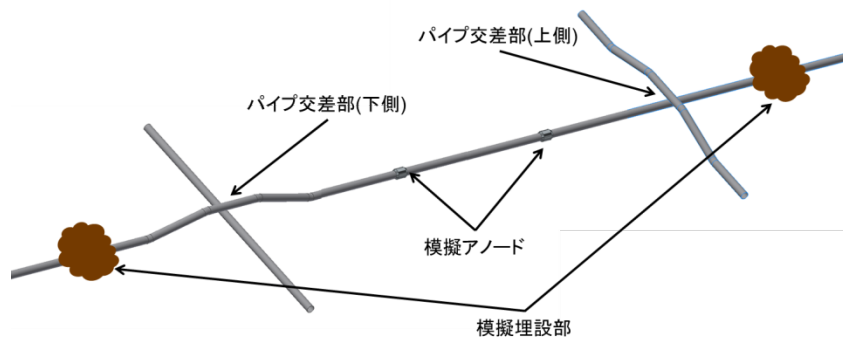
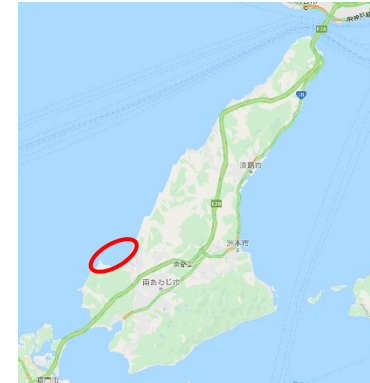
1. AUV「SPICE」開発状況

SPICE総合確認試験

【目的】 ロボットアーム & ITU追従性総合確認試験

【試験日】 2020年6月8日～11日

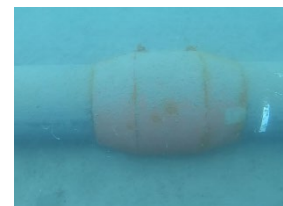
【試験場所】 淡路島沖（深度：約10m）
模擬パイプライン
（Φ250mm×L500m）



模擬埋設部



模擬アノード



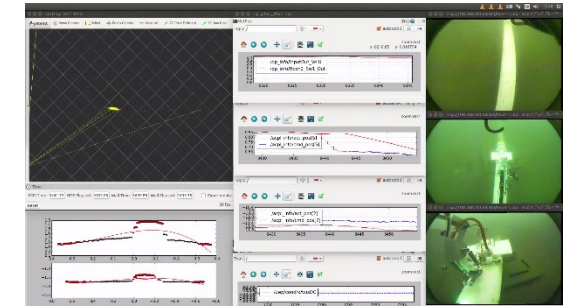
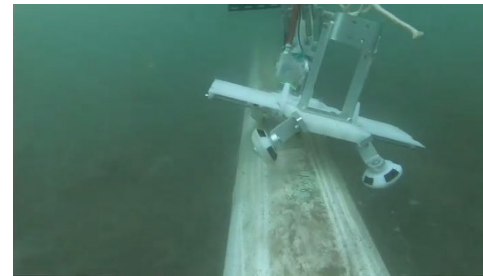
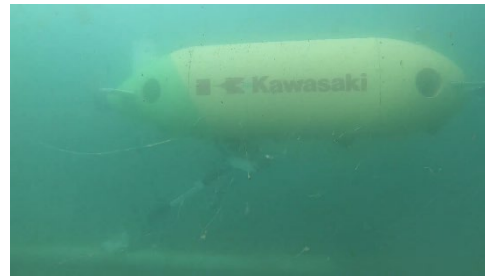
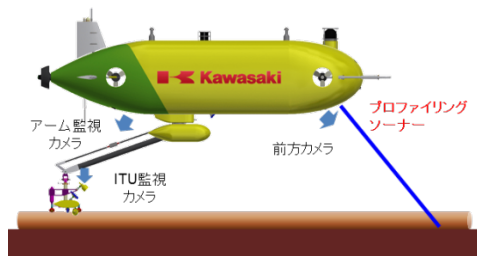
パイプ交差部



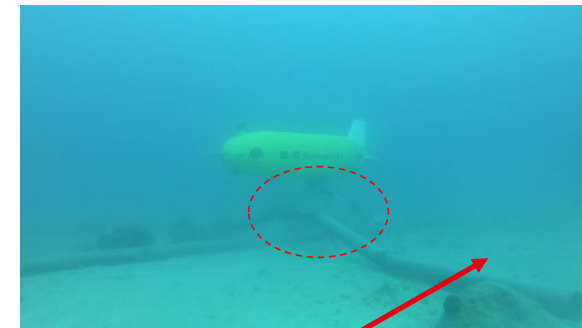
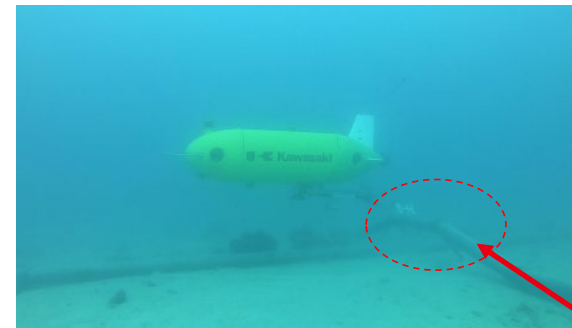
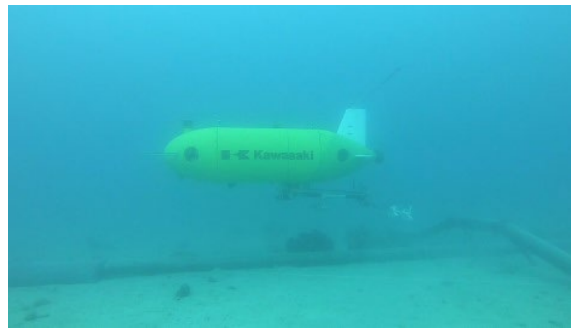
1. AUV「SPICE」開発状況

SPICE総合確認試験

✓ 高速でのトラッキング状況



✓ 障害物回避動作



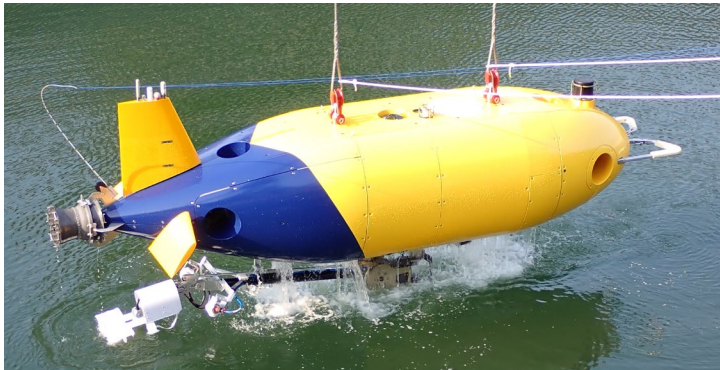
時間の流れ



パイプ交差部

1. AUV「SPICE」開発状況

英国／MODUS SUBSEA SERVICES LIMITEDより
自律型無人潜水機「SPICE」を受注 (2021.5.18公表)



SPICE-1



<主要目>

全 長 : 約5.6m
幅 : 約1.4m
高 さ : 約1.1m
重 量 : 約2.5 t (空中重量)
耐水深度 : 3,000m
最大速力 : 4 knots
推進機器 : 主推進プロペラ 1基
 サイドスラスタ 2基
 バーティカルスラスタ 2基
航行装置 : 慣性航法装置、ソーナー
安全装置 : バラスト離脱装置、イリジウムビーコン

1. AUV「SPICE」開発状況

SPICE今後の活躍



24時間365日の自動検査が可能

弊社HPより

SPICE動画URL



1. AUV「SPICE」開発状況

SPICE今後の活躍



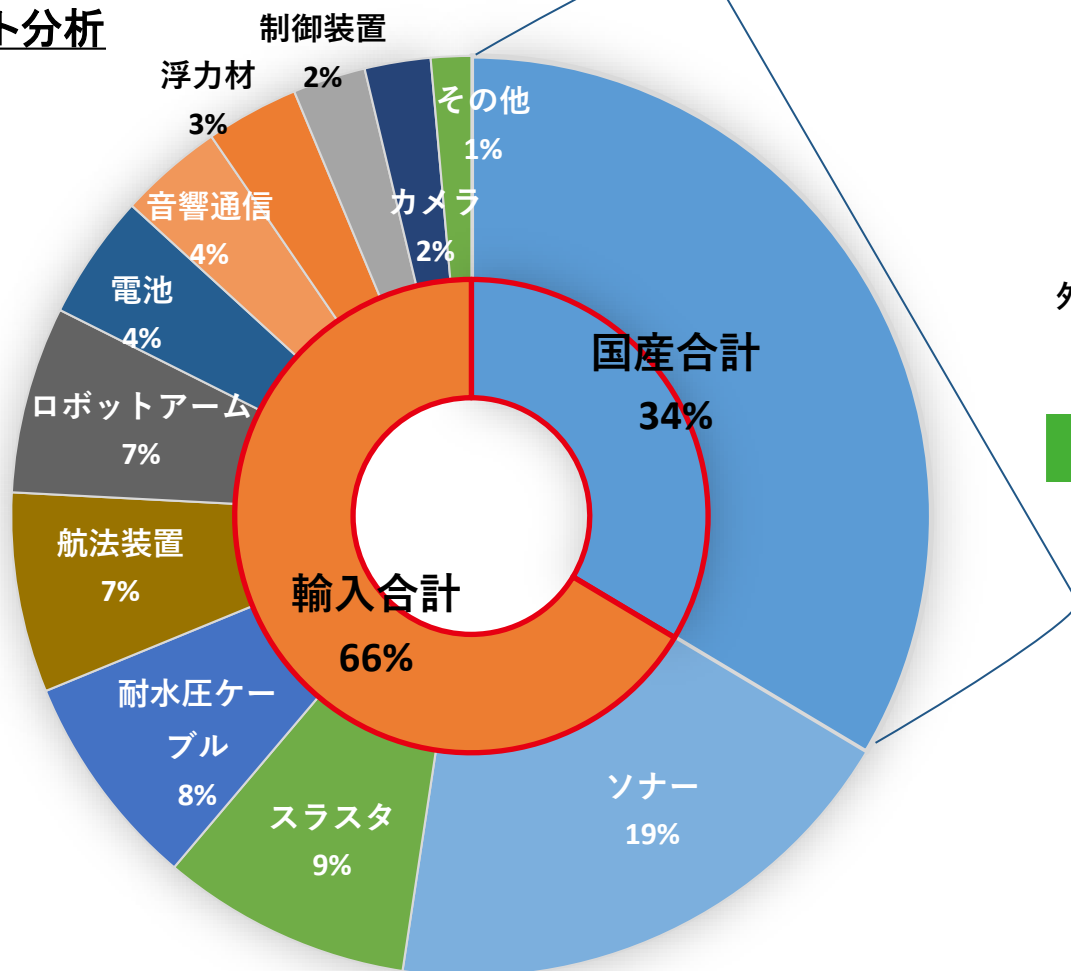
SPICE動画URL



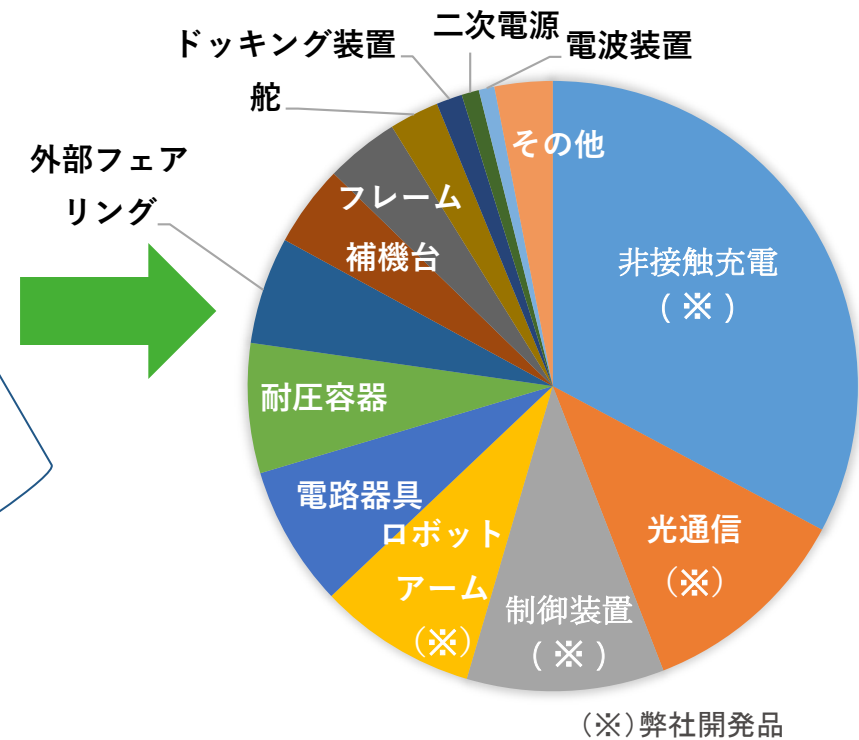
1. AUV「SPICE」開発状況

SPICEコスト分析

搭載機器のコスト分析



コスト詳細 (国産)



2. ROVの現状

考察

- 欧米では海底油田等の海洋産業が昔から盛んであり、ROVが使用されてきた。そのため欧米の大深度ROV技術は、我が国と比べ際立って進んでおり、追いつくのは困難であろう。
- 大深度ROVの国産化に向け、搭載機器のうちAUVと共通な部品は量産化によるコストメリットも考えられるが、製作にハードルが高い6000m超大深度アンビリカルケーブルは、国産メーカーが撤退しており、開発費を改めて投入するか、輸入に頼らざるを得ない。
- 本項では欧米のROVの実績と、国内外アンビリカルケーブルの状況を紹介する。

2. ROVの現状

各国の大深度ROV

(各社HPより)

Oceaneering社(米)



Vehicle Specifications

Weight in air	8,800 lb / 4,000 kg
Dimensions (LxWxH)	10.8 x 5.5 x 6.3 ft / 3.3 x 1.7 x 1.9 m
Depth rating	10,000 ft / 3,000 m (standard) 13,000 ft / 4,000 m (optional)

TechnipFMC社(米)



Specifications

Working Depth:	3,000 msw & 4,000 msw (Optional 5,000 & 6,000 msw)
Docking Interface SWL:	13,025 kg
Through-Frame Lift:	3,500 kg
Weight in Air:	5,600 kg
Dimensions:	3.5m X 1.9m X 2.1
Payload:	Up to 600 kg

Argus社(ノルウェー)



Dimensions:

Length :2,5m Width :1,6m Height :1,7m
 Weight :4500kg
 Payload :150kg
 Depth rating :6000msw, optional <7000m
 Through frame lift :Up to 3 ton

2. ROVの現状

大深度アンビリカルケーブル

Fibron社(英)

(同社カタログより)



ケーブル長は10km以上
顧客要求により延長も可

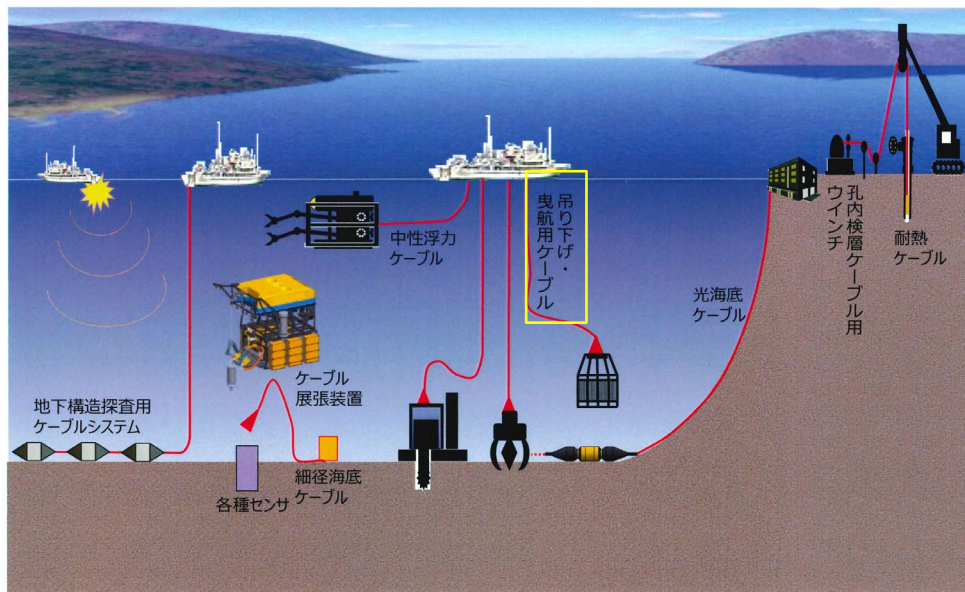
アンビリカルケーブル仕様(例)

RM0015		Cross-section example (To scale)
Overall Diameter:	35.1 mm	
Weight in Air:	4,200 kg/km	
Weight in Sea-water:	3,200 kg/km	
Minimum Dynamic Bend Radius:	480 mm	
Minimum Breaking Load:	680 kN	
Contents:	1 x 0.6 mm ² STQ 8 x 1.5 mm ² conductors 11 x 4.0 mm ² conductors 2 x (2 SM + 2 MM) FIST units	
RM0035		

2. ROVの現状

大深度アンビリカルケーブル

OCC社(日)



(同社カタログより)

【製造実績】

- 左図参照
- 4000m級のROVアンビリカルケーブル製造実績有

【大深度用のアンビリカルケーブル製造】

- <6000m : 設備投資が必要だが、製造可能
- 6000m< : 開発が必要
ただし、電力ケーブルが必要なければ10kmも製造可能
(電池搭載ROV)

【国産メリット】

- 納期、トラブル時の対応が迅速
- 国内の試験設備により、ケーブルの初期使用時の延び等に対し、予め対応可能

アンビリカルケーブルもコスト、設備投資、将来性があれば国内製造可能か

3. 有人潜水船開発にむけて

考察

- 有人潜水船は我が国の深海開発の象徴ともいべきビークルであり、また確固たる要求仕様に基づいて製作すべきものでもあるため、国産化は必須と思われる。
- 搭載機器は厳重なる国内での品質や納期管理を行うことにより、輸入品の採用も可能であろう。また、他のビークルと共通な部品は、我が国メーカーでも量産化によるコストメリットも考えられる。
- ただし、耐圧殻のチタン球殻製造技術は、現在我が国にはないと言わざるを得ない。

3. 有人潜水船開発にむけて

我が国の有人潜水船年表

	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	...	2000	...	2004	...	2017	2018	...	2024	船歴				
「しんかい2000」		△	← 8年 →													▼						23年			
「しんかい6500」										△												35年			
DSRV#1 (ちよだ)						△	← 15年 →													▼				33年	
DSRV#2 (ちはや)														△	← 18年 →										24年
DSRV#3 (ちよだ#2)																			△			6年			

【凡例】 △:竣工、▼:廃船

しんかい 6500 (JAMSTEC殿)



(JAMSTEC HP)

DSRV(*)#3 (ちよだ#2) (防衛省殿)



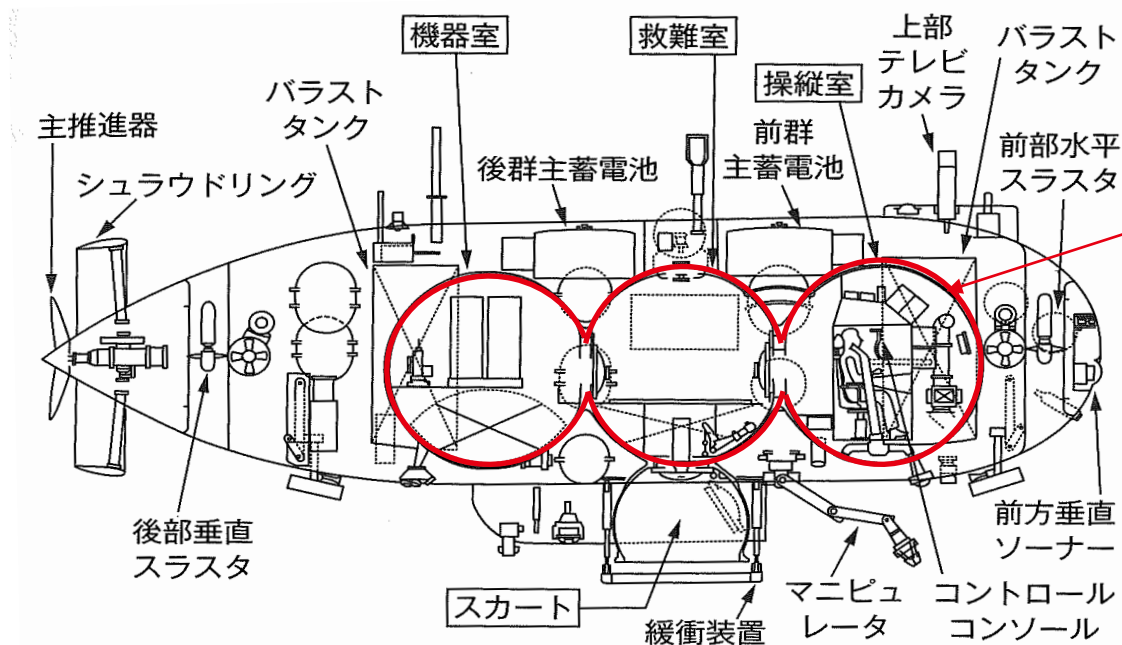
(川崎重工業 HP)

(*) Deep Submersible Rescue Vehicle
[深海救難艇]

有人潜水船はオーダーメイドであり、国産が必須

3. 有人潜水船開発にむけて

DSRV#2 (ちはや)



「潜水艦のメカニズム完全ガイド」(秀和システム)より

高張力鋼製耐圧殻

【製造】川崎重工業

【加工ポイント】

- 曲げ加工、溶接
- 切削加工(真円度向上)

ただしDSRV#3は3連球形耐圧殻をやめ、潜水艦技術が応用できる円筒型に変更

他の部品

国産品として開発し、調達

球形耐圧殻製造は、改めて製造装置等の開発が必要

3. 有人潜水船開発にむけて

しんかい 6500

チタン合金製耐圧殻

【材料】Ti-6Al-4V(チタン合金)

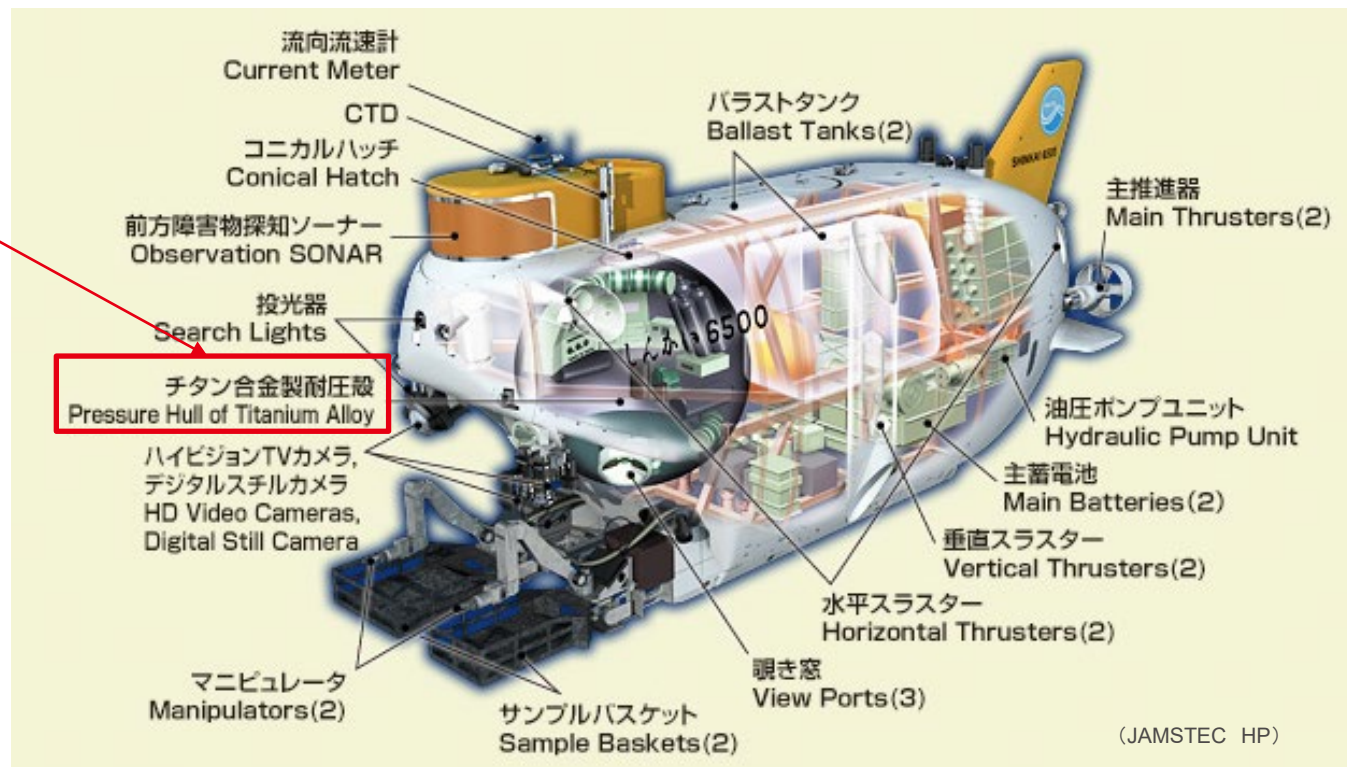
【製造】三菱重工業、(神戸製鋼所)

【加工ポイント】

- 曲げ加工、溶接
- 真円度確認

他の部品

海外カタログ品の採用もしくは国内製造にて調達可



チタン合金製耐圧殻並びにそれに付随する部品を流用することが得策？

3. 有人潜水船開発にむけて

耐圧殻流用に関する問題点

- 耐圧殻真球度に問題がないか
 - ☞ 耐圧殻応力変形などの形状歪による真球度の規定をクリアしているか
また有害なあて傷等はないか
- 耐圧殻寸法や貫通部が新しい有人潜水船の仕様を満足しているか
 - ☞ 次期有人潜水船の仕様を満たすことができる寸法や、貫通部(電線、配管、のぞき窓等)状況になっているか。
- 耐圧殻の繰り返し荷重の規定を、将来的に超えることがないか。
 - ☞ 次期有人潜水船の廃船までに、規定回数をオーバーすることがないか。



これらの問題点がクリアできなければ、耐圧殻流用は不可

世界の人々の豊かな生活と地球環境の未来に貢献する
“Global Kawasaki”