

燃料電池搭載深海巡航探查機

“うらしま”の開発

Development of Fuel Cell AUV "URASHIMA"



前田 俊夫*1
Toshio Maeda

石黒 慎二*2
Shinji Ishiguro

横山 和久*3
Kazuhiya Yokoyama

広川 潔*4
Kiyoshi Hirokawa

橋本 彰*5
Akira Hashimoto

奥田 幸人*6
Yukihito Okuda

谷 俊宏*7
Toshihiro Tani

“うらしま”は燃料電池を搭載した世界初の自律型無人潜水機であり、平成16年6月駿河湾沖で220 kmの連続長距離航走を達成した。この当社開発の完全閉ループ式の燃料電池システムを水中のビークルに搭載するうえでは様々な検討、工夫がなされている。“うらしま”は最新鋭の自律型無人潜水機として音響遠隔制御機能、重量トリム調整機能、調査観測機能等の様々な新規な機能を有している。海域試験ではこれら諸機能とともに燃料電池による給電機能、自律航行制御機能等の優れた能力を確認した。

1. はじめに

地球温暖化の原因究明には北極海の海洋データの取得・解析が不可欠と言われている。容易に近づくことが困難なこの北極海の調査を有効に行えるツールとして長距離航行可能な巡航型の自律型無人潜水機 (Autonomous Underwater Vehicle: 以下AUVとする) の開発が望まれている。“うらしま”はこの北極海の海水下を自律航行できるAUV開発のための試験機と位置づけられており、平成12年3月に(特)海洋科学技術センター(現(独)海洋研究開発機構)に納入された。その後、海洋研究開発機構とともに実海域の潜航試験を進め、リチウムイオン電池を動力源として平成13年8月にはAUVとして世界最深の3500 m潜航を、平成14年6月には132.5 kmの長距離自律航走を達成した。さらなる航続距離の延伸を目的として動力源を燃料電池に換装する工事を平成15年3月に完工し、“うらしま”は航続距離300 kmの巡航型ビークルとして生まれ変わった。

本報ではこの世界初の燃料電池搭載深海巡航探查機“うらしま”の概要と海域試験結果について報告する。

2. “うらしま”システムの構成及び運用

“うらしま”はAUVであり、航行中には基本的には母船からの支援を必要としないが、母船随伴による監視が可能よう考慮している。“うらしま”システムはビークル及び母船上設備にて構成されている。母船上設備としては制御監視パネルを収納した制御コン

テナの他、電源コンテナ、燃料電池船上設備がある。

ビークルと船上との通信は、水中では光又は音響、水上では長距離無線、船上では電波LANによる通信が可能である。“うらしま”の航行モードには自律航行モード、音響遠隔制御モード及び光ファイバケーブルによる光通信制御モード(U-ROVモードと呼称)の3つがある。音響遠隔制御モード及びU-ROVモードは母船からの遠隔指令で航行するモードであり、指令の通信手段が各々、音響もしくは細径光ファイバ(外径1 mm)を介しての光通信である。音響通信はビークルが母船の音響送受波器直下から±30度のコーン内に位置する必要があるが、U-ROVモードは潜航開始から母船との音響通信が確立する間に使われることが多い。通信監視機能が充実していることも“うらしま”の特徴の一つである。

3. ビークルの主要構成

ビークルの主要目を表1に、配置図を図1に示す。

(1) 構造

“うらしま”の機体は純チタン製のフレームをベースとし、装置、浮力材を搭載し、外部をFRP製フェアリングカバーで覆うことにより構成されている。浮力材は直径40~100 μmの微小中空ガラスマイクロバルーンを樹脂で固めた比重0.5のシタクチックフォームを使用している。

(2) 推進操縦装置

“うらしま”は巡航型のビークルであり、直進前進を運動の基本としている。操縦は船尾の垂直舵、

*1 神戸造船所潜水艦部長

*2 神戸造船所潜水艦部艦艇設計課主席

*3 神戸造船所潜水艦部艦艇設計課

*4 神戸造船所潜水艦部電武装設計課

*5 技術本部長崎研究所次長

*6 技術本部高砂研究所制御システム研究室

*7 長崎造船所火力プラント設計部燃料電池開発課

水平舵を使用する。垂直スラストは停止時（ホバリング状態）の上下移動に使用する。

(3) 重量・トリム装置及びバラスト装置

潜航中、ブイクルの重量・トリムを調整できる機能を持っていることは“うらしま”の大きな特徴である。これは行動範囲の広い“うらしま”にとって海水温度、密度の変化により浮量バランスが変動することが予想され、その状況でも安定した航走を可能とするためである。前後傾斜角（トリム）の調整は約50 kgfの重錘を前後に±1 m移動させるトリム調整装置によって行う。また、油ブラダに油を出し入れする浮量調整装置により約60 kgfの浮量調整が

表1 ビークル主要目

| 項目 | 要目 |
|--------------|--|
| 型式 | 自律型無人潜水機（AUV） |
| 主要寸法（m） | 長さ×幅×高さ：約10.7×1.3×1.5 |
| 空中重量（t） | 約10 |
| 最大潜航深度（m） | 3500 |
| 最大航続距離（km） | 300 |
| 水中速力（巡航）（kt） | 約3 |
| 船体システム | トリム調整装置、浮量調整装置 浮上用バラスト装置、応急投棄バラスト装置 |
| 動力装置 | 燃料電池システム 燃料電池：固体高分子形（PEFC） 定格4 kW 120 V 酸素ガス容器 内圧 14.7 MPa 水素吸蔵合金システム 補助電源 常備用リチウムイオン2次電池 |
| 推進操縦装置 | 前後スラスト 1.8 kW × 1 垂直スラスト 0.6 kW × 2 水平スラスト 0.6 kW × 1 垂直舵、水平舵 |
| 調査観測装置 | TVカメラ、水中投光器 サイドスキャンソナー スナップショットデジタルカメラ、CTDO計、 多点採水装置（リチウムイオン電池動力時搭載） |
| 航海装置 | 慣性航法装置、傾斜計、ドップラソナー、 深度計、高度ソナー、GPS測位装置、 音響ホーミングソナー、前方高度計、 音響トランスポンダ、応急用トランスポンダ |

可能である。ミッション終了後の浮上は浮上用バラストを投棄することによって行なわれる。

(4) 調査観測装置

海底調査のための観測装置としてTVカメラ、スナップショットデジタルカメラ、サイドスキャンソナーを搭載している。巡航中の海洋観測のための装置として塩分濃度、水温、溶存酸素を連続計測するCTDO計及び多点採水装置を有している。多点採水装置は1セル当り250 ccの海水を200セルまでサンプリングすることができる。

4. 燃料電池システム

4.1 燃料電池

水中のブイクルで使用する動力源は小型・軽量であること、取り扱いが容易であることが求められる。“うらしま”の動力源は固体高分子形燃料電池（Polymer Electrolyte Fuel Cell：以下PEFCとする）を使用している。PEFCは他の形式の燃料電池と比べて作動温度が60～80と低いという特徴がある。温度が常温に近いため発停が容易であり、防熱対策も可能な温度であり、小型・軽量のシステム構成にすることが可能である。当社は“うらしま”動力源として本燃料電池システム及び燃料電池スタックを開発した。本燃料電池は2基のスタックを直列に接続しており、定格出力は120 V、4 kWである。図2に“うらしま”の燃料電池システムの構成、図3に写真を示す。

“うらしま”搭載の燃料電池システムは陸上のものと異なり、完全閉ループ式の燃料電池である。燃料電池はチタン合金製の耐圧容器内に収納されており、酸素ガスは高圧（14.7 MPa）の酸素ガス容器から供給され、燃料である水素ガスは耐圧容器に収納された水素吸蔵合金から供給されている。酸化剤として空気ではなく純酸素を使用するという点も閉ループ式であるゆえの一つの特徴である。燃料電池スタックを通過し

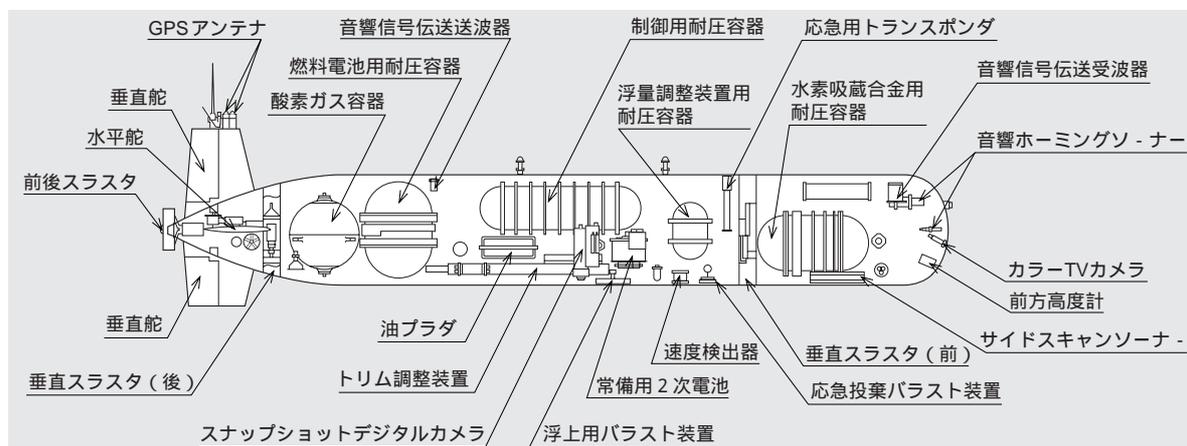


図1 ビークル配置図 ビークルの配置図（側面）を示す。

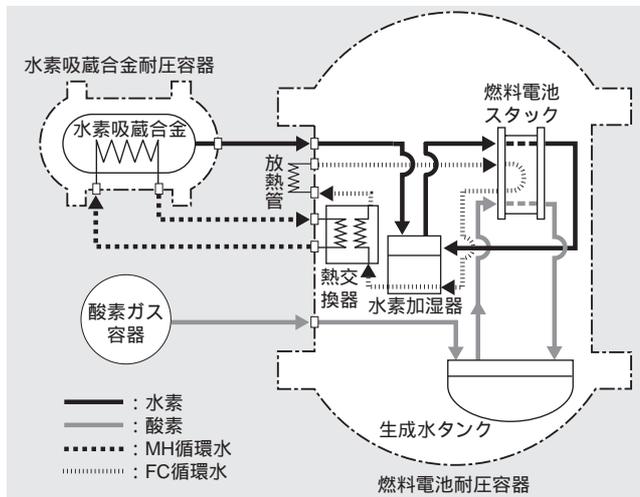


図2 燃料電池システム構成図 “うらしま”燃料電池システムのガス・循環水の系統概要、構成を示す。

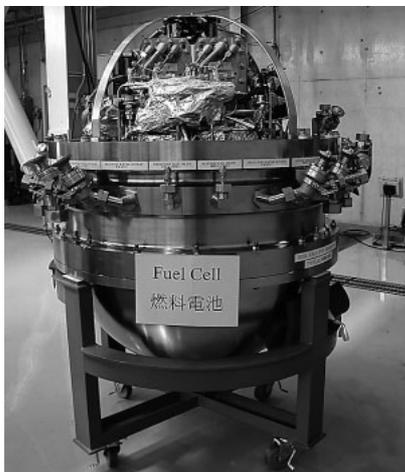


図3 燃料電池 ピークル燃料電池耐圧容器に搭載した燃料電池本体の写真を示す。

た未反応ガスは系内で再循環され、生成された水は燃料電池耐圧容器内にある生成水タンクに貯められる。

PEFCにとって温湿度管理は非常に重要であるが、燃料電池スタックには一定温度の循環水を流し運転温度を保つとともにガス系については防熱とヒーティングにより温湿度管理を行っている。循環水系には耐圧容器外部への放熱管があり、この流れをコントロールすることにより温度を一定に保っている。

4.2 水素吸蔵合金

水素ガスについては安全性を考慮し、水素吸蔵合金(MH: Metal Hydride)による貯蔵方式を採用した。水素貯蔵合金は吸蔵効率が良く、常温範囲(20~60)で吸蔵放出できるAB5型希土類系合金を使用している。

水素吸蔵合金からの水素放出は吸熱反応であるが、その熱源として燃料電池の排熱を利用し放出のコントロールをしている。

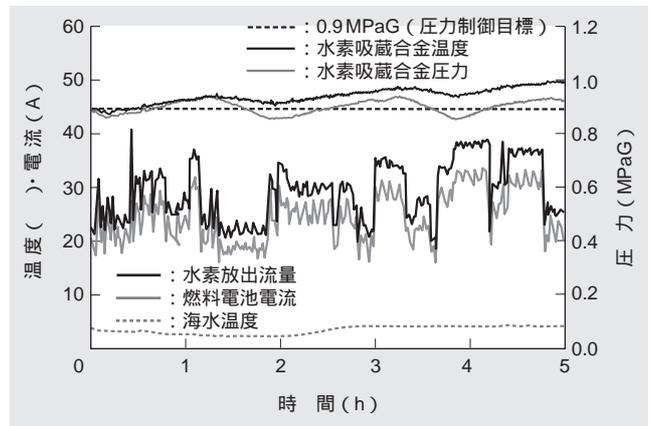


図4 水素吸蔵合金の圧力制御 水素吸蔵合金の温度を循環水により制御することにより、ガス圧を一定の範囲に保持している。

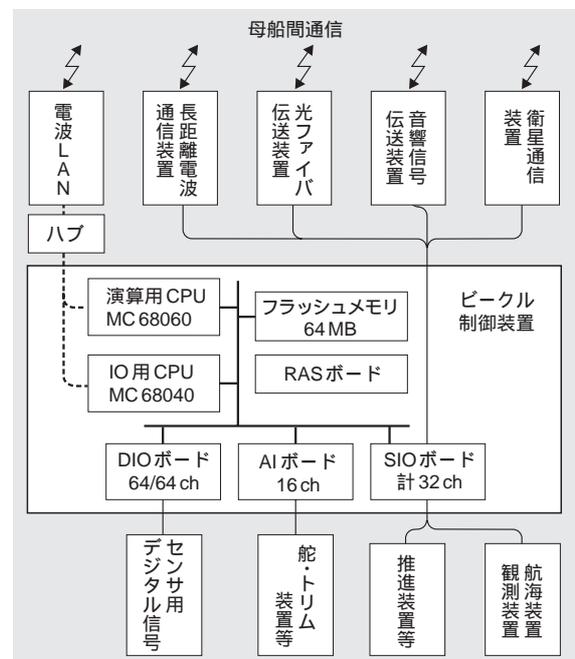


図5 制御システム構成 ピークル制御システムの構成と外部インタフェースを示す。

図4に海中での水素吸蔵合金のガス圧制御状況の一例を示す。水素ガスの使用に伴い、水素吸蔵合金圧力は低下してくるが、圧力が低下すると循環水を流し水素吸蔵合金の温度を上げ、水素吸蔵合金圧力を上昇させている。圧力が所定の値まで上昇すると循環水の流れを停止する。この温度制御により水素吸蔵合金圧力を0.85~0.95MPaGの範囲に制御している。

5. 自律制御

5.1 システム構成及び機能

自律制御に用いられる制御システムの構成図を図5に示す。ピークルの制御装置は演算用CPUとIO用CPUにより構成されており、制御用耐圧容器に収納されている。ピークルの各アクチュエータ、センサは

全てピークル制御装置により制御されるが、燃料電池及び水素吸蔵合金はそれぞれの耐圧容器に個別の制御装置を有する分散制御システムとしている。

自律航走中は予め入力されたシナリオに基づき、ピークルは制御されるが、光または音響による船上からの指令は随時入力可能である。ピークルから船上へのデータ送信は常時行っており、ピークルの状態量(深度, 針路, 速力, 姿勢角, 座標等)や各機器の運転状態及びTV画像, サイドスキャン画像をモニターできる。浮上状態では長距離無線による双方向通信が可能となっている。

5.2 自律航行機能

“うらしま”の自律航行は予め入力されたシナリオによって行われる。その実行は階層的な4つのタスク、(a)統括制御タスク (b)航行パターン実行タスク (c)運動制御処理タスク (d)アクチュエータ制御タスクによって行なわれる。統括制御タスクではシナリオの実行・進行を管理しており、航行パターン実行タスクでは針路変更・保持・深度変換・保持などの航行パターンの実行を管理する。運動制御処理タスクでは航行パターンを実行させるための各アクチュエータの制御指令値を決定し、アクチュエータ制御タスクがスラスト、舵及びトリム調整装置などの各アクチュエータを駆動する。

シナリオは航行コマンドをシーケンスに並べた形で構成しており、航行コマンドとしては“所定のポイントに向かう”、“トランスポンダの信号により位置補正を実行する”、“一定の深度(高度), 方位で航走する”、“指定の位置で観測を実施する”等が用意されている。

6. 海域試験

平成16年6月9日～11日に駿河湾の南北25kmの2地点間を往復自律航走する長距離航走試験を実施した。深度800m, 平均速力約2.8ktで連続43時間の自律航走を行ったところで台風の接近のため試験中断となったが、220km連続長距離航走を達成した。

燃料電池は航走中、ピークルの速力変換等の負荷変動にスムーズに追従し、安定した作動を示した。水素吸蔵合金からの水素供給も良好であり、燃料電池システム全体としての良好な作動が確認できた。図6に試験時の燃料電池運転状況を示す。

自律航走は南北に設置した2つのトランスポンダを基準点として設定したコースを航走する形で行った。通常ピークルは慣性航法装置にて位置を認識して航走するが、慣性航法装置は潮流などの加速度成分の小さな外乱のもとで長時間航走を行うと誤差が蓄積し実位置とずれが生じてくる。このため“うらしま”は設置

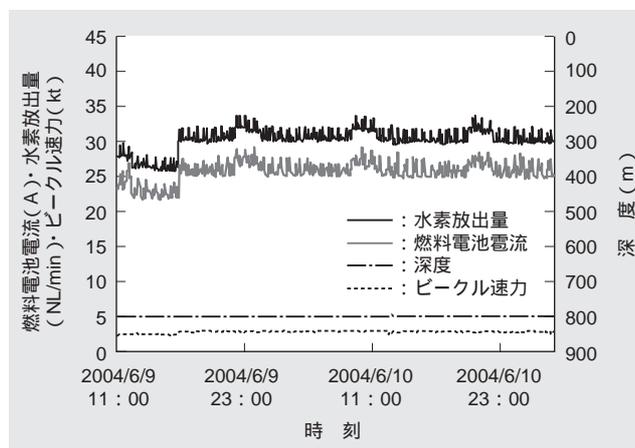


図6 燃料電池運転状況 海域試験における燃料電池の運転状況データを示す。

位置を予め計出(キャリブレーション)した音響トランスポンダを基準とし、音響測位により位置補正を自律的に行っている。

7. ま と め

6月の海域試験では燃料電池が水中の動力源として有用であることは十分実証できたものと思われる。また、43時間の連続航走の間、自律制御システムは良好に機能しシナリオどおりの航走を行うことができた。

最後に、“うらしま”及び“水中ピークル用燃料電池システム”の開発にあたり、開発当初から御指導戴いている(独)海洋研究開発機構には深く謝意を表すものである。

参 考 文 献

- (1) 百留忠洋, 深海巡航探査機“うらしま”の現状と将来, 日本マリンエンジニアリング学会誌 Vol.37 No.9 (2002) p.23
- (2) 青木太郎ほか, PEFC深海巡航探査機“うらしま”, 燃料電池シンポジウム予稿集(2003) p.90
- (3) Aoki, T. et al., Fuel Cell Underwater Vehicle "URASHIMA", ISOPE-2004 Conference Proceedings (2004)



前田俊夫



石黒慎二



横山和久



広川潔



橋本彰



奥田幸人



谷俊宏