

しんかい 6500 用リチウムイオン電池の性能向上

Upgrade Program of Lithium-ion Battery for “SHINKAI 6500”

西 沢 和 樹* 中 村 慶 太* 河 村 浩** 吉 田 浩 明*
並 河 芳 昭* 小 椋 徹 也*** 殿 本 浩 史****

Kazuki Nishizawa Keita Nakamura Hiroshi Kawamura Hiroaki Yoshida
Yoshiaki Namikawa Tetsuya Komuku Hirofumi Tonomoto

Abstract

“SHINKAI 6500” is a manned submersible which is owned by JAMSTEC (Japan Agency for Marine–earth Science and Technology). The “World–class” deep sea vehicle can dive to 6,500 meters depth, covering 98% area of entire world ocean. Since its first launch in 1991, Silver–zinc batteries had been used as a main battery. In 2004 they were replaced with the Lithium–ion batteries. Lithium–ion batteries have unique equipment, metallic bellows in their cells and a rubber–bladder in a battery, in order to tolerate high pressure in deep sea. In 2011, the vehicle completed the major upgrade to change the main thrusters and motors. And in accordance with its improvement, the housing of the batteries was changed from titanium to CFRP. The material change of housing makes a contribution to small and lightweight. It could consequently improve the motion and control performance of the vehicle. Hereafter further contribution to ocean research is expected by dive research of upgraded “SHINKAI 6500”.

Key words: Lithium–ion batteries; Manned submersible; Metallic bellows; Rubber–bladder; CFRP

1 緒言

地球地表の 70% を占める海洋を調査することは、新たな生命体の発見と深海の生物生態調査、地球の活動と環境変動の解析のための調査、エネルギー・鉱物

資源調査、地震メカニズムの解明と予測精度向上のための地殻構造調査等様々な科学分野において、重要な役割を果たす。

海洋国家である日本は、様々な調査船や探査機を保有しており、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) が保有する「しんかい 6500」(Fig.1) は、6,000 m 級の海域を潜航できる世界有数の有人潜水調査船である。「しんかい 6500」は 1989 年に竣工し、性能試験において深度 6,527 m まで潜航した。現在まで通算 1,300 回以上の調査潜航を行い、世界の様々な海洋における深海調査に貢献してきた。

「しんかい 6500」の電力は、潜航時の推進力、海

* (株)ジーエス・ユアサ テクノロジー
特殊・リチウム電池本部 技術部

** (株)ジーエス・ユアサ テクノロジー
事業推進部

*** 海洋研究開発機構 (JAMSTEC)

**** 三菱重工業株式会社

底サンプル採取時のマニピュレータの動力，調査観測時のライトおよび母船との音響通信などに使用される。就航当初，電池は酸化銀-亜鉛電池が使用されていたが，様々な要素の研究試作を経て，2004年から高容量・高エネルギー密度であるリチウムイオン電池に換装された^{1,2}。さらに，2011年には「しんかい6500」の運動性能向上の一環として，スラスターなどの推進システムの改造と共に，当初より使用していたチタン製の電池収納槽を，より小型軽量のCFRP（炭素繊維強化プラスチック）製の電池収納槽に変更した。

本報告では，「しんかい6500」用リチウムイオン電池の性能，電池収納槽変更に伴う電池の変更点，潜航実績および改造に伴う潜水船の性能向上効果について述べる。

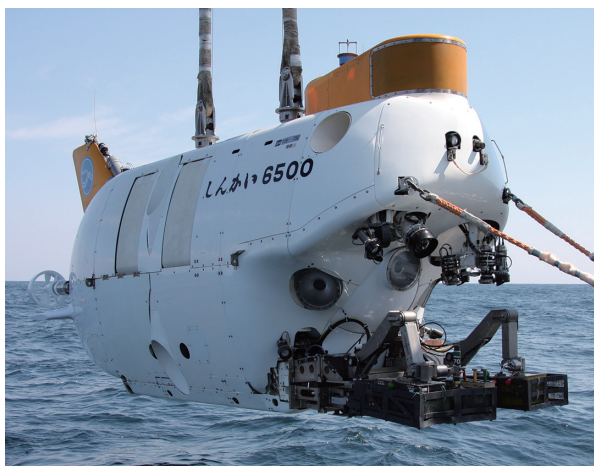


Fig. 1 Appearance of “SHINKAI 6500”.

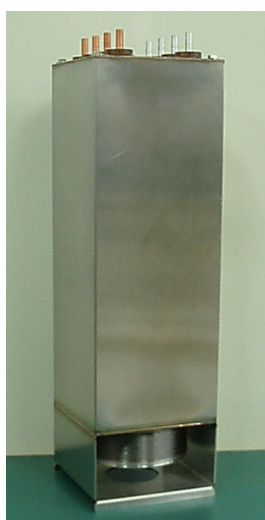


Fig. 2 Appearance of cell “LFL400”.

2 特長と性能

2.1 単電池の特長と性能

「しんかい6500」用リチウムイオン単電池“LFL400”の外観写真をFig. 2に，その仕様をTable 1に示す。単電池は，正極にコバルト酸リチウム，負極にカーボンを使用し，角形のステンレス製ケースに正極板，セパレータおよび負極板を積層して収納している。また，単電池下部には，均圧装置（金属ベローズ）を装備しており，単電池内の空間はすべて電解液で満たされている。均圧装置は単電池を深海の高圧下で使用する際に，深度圧が作用し，その圧力に応じて金属ベローズが縮まることにより，単電池内外の圧力を均一にし，単電池の変形および破壊を防ぐ機能を有する。

本単電池は，深海という特殊環境下において，高圧および低温下で，優れた電池性能が要求される。高圧下および低温下における放電特性をそれぞれFig. 3お

Table 1 Specification of “LFL400” cell.

Items	Contents
Nominal capacity	500 Ah
Rated capacity	400 Ah
Nominal voltage	3.6 V
Operating voltage range	3.0 - 4.0 V
Dimensions	W 138 mm
	D 138 mm
	H 457 mm
Mass	18.5 kg or less
Energy density	97 Wh/kg
	195 Wh/l
Life	3 years or 200 cycles

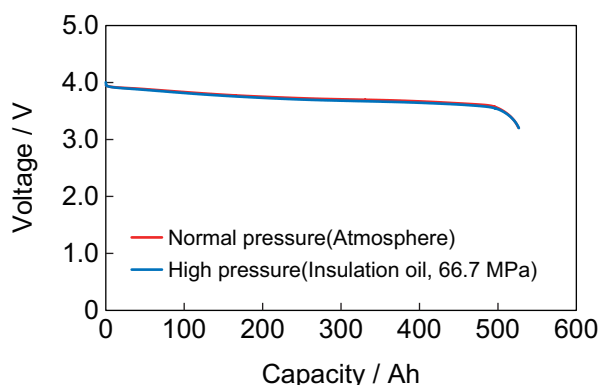


Fig. 3 Discharge curves of “LFL400” cells under normal pressure and high pressure.

Charge : Multistage constant current to 4.0 V at 25 °C
(Current : 80 A - 40 A - 20 A - 10 A)

Discharge : 90 A to 3.0 V at 25 °C

よび Fig. 4 に示す。

Fig. 3 から、最大潜航深度 6,500 m 相当の圧力 (66.7 MPa) 印加状態において、公称容量である 500 Ah を十分満足することが確認できた。また Fig. 4 から、深海の最低水温に相当する 0 °C の低温下においても、公称容量を十分に満足することが確認できた。

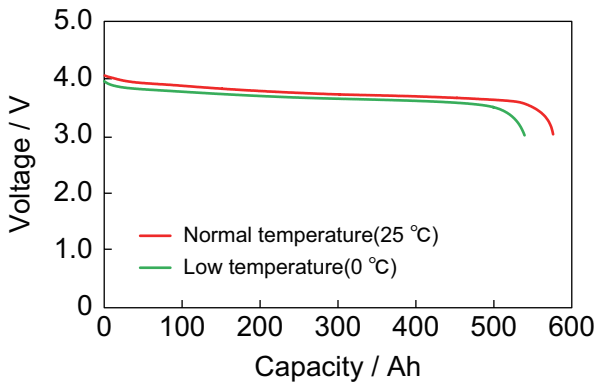


Fig. 4 Discharge curves of "LFL400" cells under normal temperature and low temperature.

Charge: Multistage constant current to 4.0 V at 25 °C
(Current: 80 A - 40 A - 20 A - 10 A)

Discharge: 90 A to 3.0 V at 0 °C, 25 °C

すなわち、単電池 "LFL400" は深海で想定される使用環境下において、必要な放電性能を有することがわかる。

2.2 組電池の特長と性能

組電池は、電池収納槽に単電池 "LFL400" を 30 個収納し、これらを直列接続することにより構成されている。電池収納槽の下部には、単電池と同様に、深海の高圧による電池収納槽の破損および変形を防ぐため、ゴムとゴム引布を交互に積層させ、突き刺し強度の優れたゴムブラダを均圧装置として装備している。組電池は、収納槽内部に均圧油として、電気絶縁油 (JIS C 2320 1 種 2 号) で満たした油漬均圧型である。油漬均圧型の原理を Fig. 5 および Fig. 6 に示す。

(1) 潜入時 (Fig. 5)

- (a) 組電池に深度圧による圧力が加わり、海水により温度が低下する。
- (b) 圧力上昇および温度低下により、収納槽内の残存エア、絶縁油および電解液の体積が収縮する。
- (c) 体積収縮と同時に均圧装置が変位し、均圧装置内の絶縁油が均圧孔を通して収納槽内に供給されることにより、収納槽内外を均圧にする。

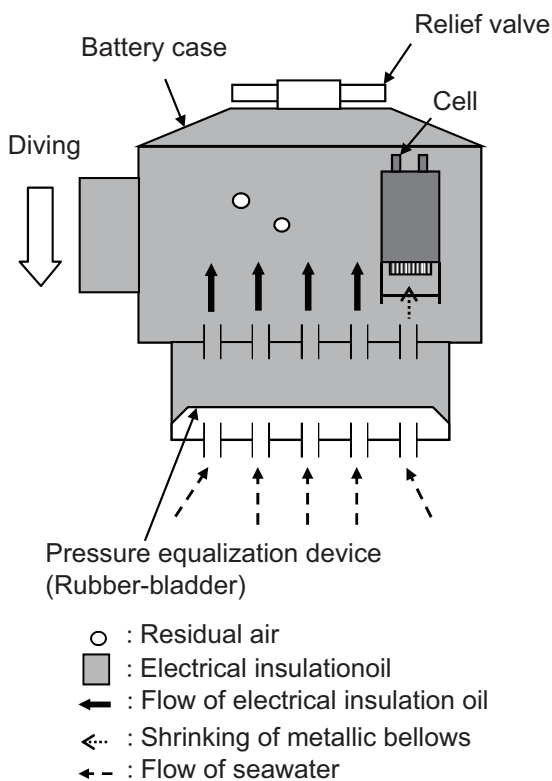


Fig. 5 Pressure equalization principle of "LFL400-30" battery during diving.

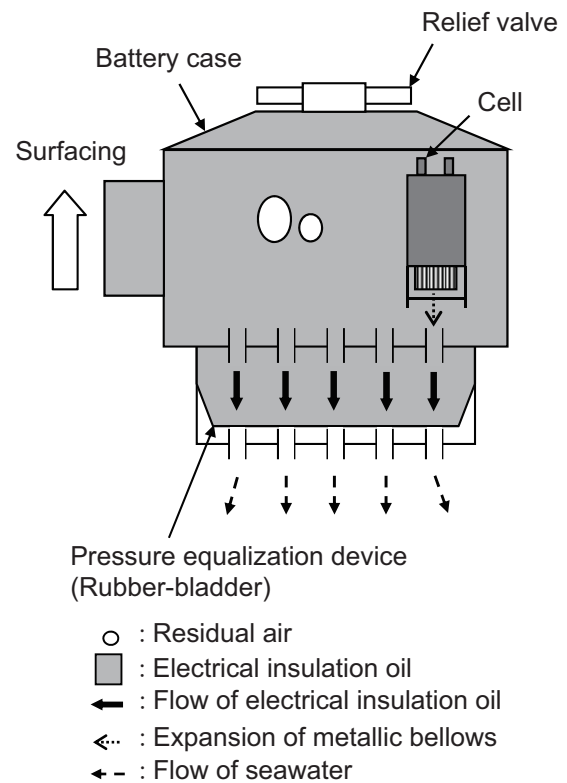


Fig. 6 Pressure equalization principle of "LFL400-30" battery during surfacing.

(2) 浮上時 (Fig. 6)

- (a) 組電池に深度圧により加わっていた圧力が低下し、海水により低下していた温度が上昇する。
- (b) 圧力低下および温度上昇により、収納槽内の残存エア、絶縁油および電解液の体積が膨張する。
- (c) 体積膨張と同時に均圧装置が変位し、収納槽内外を均圧にする。

また、万が一外部短絡が発生した場合、大電流によって電池が損傷することを防ぐために、電力供給ラインにはノーヒューズブレーカー (NFB) を装備している。同様に、単電池の電圧監視ラインにはヒューズを装備している。それらは、高圧および絶縁油中においても作動する専用の保護回路である。

組電池は、「しんかい 6500」の潜水船の右舷および左舷に各々 1 台搭載されている。組電池は、深度 6,500 m まで潜航する場合において、支援母船「よこすか」からの海面までの着水時間として約 0.5 時間、海底までの下降時間として約 2.5 時間、海底における調査時間として約 3 時間、海底から海面までの上昇時間として約 2.5 時間、母船への揚収時間として 0.5 時間の計 9 時間におよぶ長時間運用で使用される。運用終了後は、母船に装備されている専用充電装置にて充電を実施し、次回の運用に備える。

3 組電池の変更点

2011 年に「しんかい 6500」の運動性能向上の一環として、酸化銀 - 亜鉛電池に使用していたチタン製の電池収納槽を CFRP 製に変更した。電池収納槽は、



Fig. 7 Appearance of upgraded-type "LFL400-30" battery with CFRP case.

当社が電池収納に必要な寸法および構造を算出し、三菱重工業(株)がそのデータをもとに設計・製造した。電池収納槽は組電池製造時に、三菱重工業(株)より当社に支給される。CFRP 製電池収納槽を使用した電池の外観を Fig. 7 に、チタン製電池収納槽を使用した電池の外観を Fig. 8 に、各電池の仕様を Table 2 に示す。

変更した電池収納槽の材質である CFRP の物性は引張強さ 430 MPa、比重 1.6 であるのに対して、従来の材質であるチタン (TP340) の物性は引張強さ 340 ~ 510 MPa、比重 4.5 である。CFRP はチタンと比較して、引張強さがほぼ同等であるのに対して、比重が 1/3 であることから組電池の軽量化に大きく貢献した。また、寸法をリチウムイオン電池用として最適化したことにより、電池収納槽内部の絶縁油量を減少することができ、組電池質量を合計で約 320 kg (14%) 軽量化することに成功した。

4 潜航成果

2012 年 3 月に推進システムの改造と共に、CFRP 製電池収納槽を使用した電池に換装した。推進システムの改造にあたり、潜水船の質量増加抑制のため、組

Table 2 Specification of "LFL400-30" battery.

Item	Upgraded-type	Old-type
Dimensions	W 1097 mm	1001 mm
	D 1117 mm	1158 mm
	H 755 mm	986 mm
Housing material	CFRP	Titanium
Mass	980 kg or less	1140 kg or less
Rated	400 Ah × 108 V	←



Fig. 8 Appearance of old-type "LFL400-30" battery with titanium case.

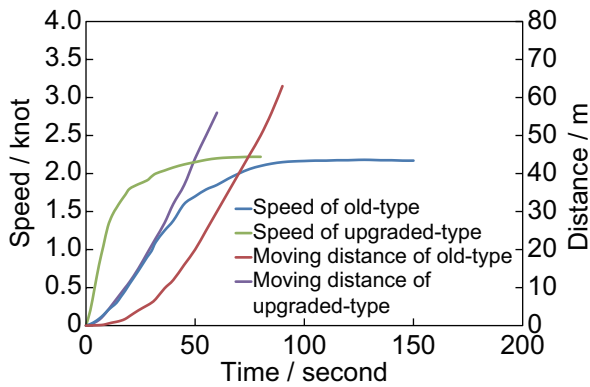


Fig.9 Acceleration characteristics of the "SHINKAI 6500" vehicle.

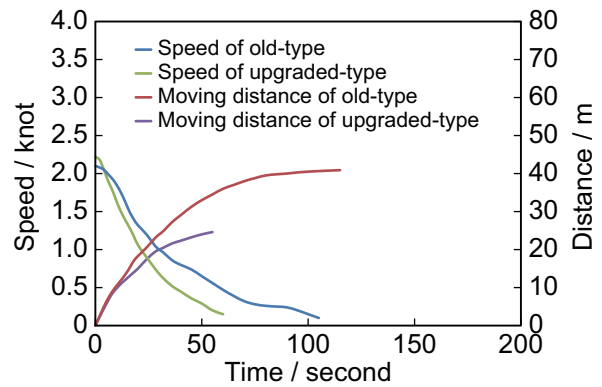


Fig.10 Stop control characteristics of the "SHINKAI 6500" vehicle.

Table 3 Comparison of "SHINKAI 6500" vehicle motion performance.

Item	Upgraded-type	Old-type
Maximum speed	2.7 knots	2.5 knots
Main thruster	2 Middle-sized fixed-type aft thruster	1 Swing-type aft thruster
Lateral motion	○	×

電池の小型軽量化は必須事項であった。改造前後の潜水船の性能を Table 3 に、潜航時の加速時間の変化を Fig. 9 に、制動時間の変化を Fig. 10 に示す。

推進システムの改造により、潜航時の加速時間は従来の約 75%、制動時間が約 50%に短縮し、上下、前後、左右における三次元的な移動がスムーズに行えるようになった³。そのため、海底の熱水噴出域や沈み込み帯といった地形の複雑な海域における調査効率が大きく向上した。したがって、組電池の小型軽量化は、推進システムの改造実現に大きく貢献したといえる。

従来は電池を含む潜水船が重いため、深海の中では比較的浅い海域である 2,000 m 以浅の海域では、浮量バランスを取ることが困難であった。電池の軽量化を含めて、潜水船全体のバランスが改善され、浅海域から深海域までの幅広い調査潜航が従来よりも容易になった。

「しんかい 6500」は 2013 年 1 月から、海洋の極限環境域における生態系を総合的に調査・研究するた

め、世界一周航海である "QUELLE 2013" プロジェクトで、調査活動を行っている。

5 結言

「しんかい 6500」用リチウムイオン電池は、深海という特殊環境下において、所定の放電性能を満足し、長時間潜航および調査活動を可能にしている。また、高圧による機械的影響に対しては、均圧装置を用いて補償している。今回の電池収納槽の変更により、電池質量および体積が大幅に低減し、「しんかい 6500」の運動性能向上に貢献した。今後「しんかい 6500」が、日本のみならず世界の海洋調査研究に貢献することが期待できる。

文 献

1. S. Ogura, I. Kawama, T. Sakurai, T. Yoshiume, K. Iijima, Y. Imai, A. Ikuta, and M. Iwata, TECHNO-OCEAN '04, Kobe Japan, 3, p.1720(2004).
2. 中村慶太, 社団法人日本深海技術協会会報, 2008(2), p.11(2008).
3. 小椋徹也, 川間格, 吉梅剛, 月岡哲, 齋藤文誉, 松本恵太, 千葉和宏, 小倉訓, 櫻井利明, 海洋理工学会大会講演論文集 平成 24 年度春季大会, p.33(2012).