

海外における深海有人潜水船の 開発動向と我が国の進むべき道

有人潜水船によって、現在、世界の海底の99%が研究調査可能となっている。大深度有人潜水船は、我が国では(独)海洋研究開発機構が「しんかい 6500」(最大潜航深度 6500m)を運用しており、他に、米国ウッズホール海洋研究所 WHOI のアルビン(同 4500m)、フランス国立海洋開発研究所 IFREMER のノチール(同 6000 m)、ロシアのミール 2 隻(同 6000m)が運用されている。我が国の「しんかい 6500」は、1990 年 6 月の初潜航以来、世界最深の潜航能力を活かしてさまざまな成果をあげてきており、2007 年 3 月には通算 1000 回の潜航を達成している。

米国では初代潜水船アルビンが 1964 年に進水して以来、4000 回以上の潜航を行っており、2005 年 10 月より、代替の新有人潜水船(最大潜航深度 6500m)の建造が開始された。6500m までの下降時間は 2.5H とされ、浮力材・耐圧殻・動力源・浮力調整システムなどの重要技術を大幅に改良し、科学研究への運用は 2010 年を目標にしている。この建造をめぐるのは、無人探査機を推進するグループとのあいだで大きな議論があったが、有人潜水船・無人探査機が共に必要であるということで折り合い、建造されることになった。また、中国も深度で世界一を目指す 7000 m 級有人潜水船の建造を開始した。軍事や海底資源の確保にイニシアティブをとりたいという意思を反映していると考えられる。中国には大深度有人潜水船の基盤技術はほとんどないが、中核技術である耐圧球殻と浮力材は外国から購入し、組み立てとその他の技術を自主開発していくとしている。2008 年の竣工を目指し、7000m 級としての安全信頼性の技術をどのように確立していくのかが注目される。

有人潜水船の調査の目的には、地球の成り立ちの解明、生物の進化の解明、深海生物の利用と保全、熱と物質の循環の解明などの分野がある。今後も深海科学技術をリードし、科学者に最先端の調査研究ツールを提供するとともに、大深度有人潜水船と関連する技術を維持発展させていかなければならない。我が国の「しんかい 6500」は建造以来 20 年が経過しており、部分的な機能向上を図ってきたものの、科学者の要求にこたえるためにはさまざまな新技術を採用入れた次代の有人潜水船を検討する時期に来ている。これまで大深度における海底・海中の調査研究で世界をリードしてきた我が国としては、高速潜行浮上、任意深度の中層潜航、長時間潜航を可能とし、無人探査機とのコラボレーションによって安全で効率的な調査が可能となるシステムを、第三世代の有人潜水船として開発していくべきであろう。

海外における深海有人潜水船の開発動向と我が国の進むべき道

工藤 君明
客員研究官

1 はじめに

我が国の有人潜水調査船「しんかい 6500」は最大深度 6500m まで潜航できる世界でも唯一のものである。1990 年に就航、1991 年に調査潜航を開始してから、2007 年 3 月には 1000 回の潜航を達成した。日本近海のみならず世界の大洋で、海底の地形や地質、深海に生息する生物などの調査を行い数々の成果を上げてきた¹⁾。また専門的な研究者だけでなく、これから科学技術を目指すという研究者の卵たちにも開放され、好評を得ている²⁾。

この間、「しんかい 6500」には種々の改良がなされ、個々の部品が高機能のものに交換され、大きなトラブルもなく安全に運用され、安全性と信頼性の技術が確立されてきた。しかし建造からすでに 20 年が経過しており、システム全体として老朽化や陳腐化が進んでいる。また海外でも「しんかい 6500」と並ぶ、あるいはそれを超える有人潜水船が、新たに開発建造されようとしている。さらには、無人の潜水調査機器もが開発運用されるようになり、我が国においても、有人潜水船の存在意義やあり方、あるいは「しんかい 6500」の後継をいかにすべきかなどを検討する時期に来ている。

我が国では、「しんかい 6500」

と併用して、2000m 級の有人潜水船「しんかい 2000」を運用してきた。「しんかい 2000」が 2004 年から運用休止となったときに、深海探査研究を今後とも「有人潜水船」で進めるのか、遠隔操作あるいは自律型の無人探査機で進めるのかという討論会がもたれたことがある^{3, 4)}。一方のグループには、「海中の生物を研究するには研究者が肉眼で直接に観察したい、そのために有人潜水船は必要不可欠である」とする人たちがいた。他方には、「無人探査機に高性能のカメラを搭載して広域に観察すべきである。はっきり見える範囲がせまくてよく観察できないというなら、立体視でき、奥行きも広くできるカメラ技術を開発することは可能である」という人たちのグループがあった。このときの討論では、完全に自律型の人工知能海中ロボット (Autonomous Underwater Vehicle) こそが真の無人機であるという議論もあり、「有人」とはなにかという定義まで論争になった。しかし、人間が潜水船に乗って大深度まで行くことの、科学的な、あるいは科学技術的な意義があるのかないのかについては、このときは明確にされなかった。

また「しんかい 2000」の運用休

止にあたり、科学への貢献と有人潜水船調査船の必要性が論じられた著書もある⁵⁾。著者の一人は自らの潜航体験を踏まえて、有人潜水船による調査が必要な理由として、第一に人間の「目」の良さ、つまり、現在の技術で人間の目を作ることはできないこと、第二に科学者の「知的好奇心」、つまり、知的欲望がなくなれば科学の進歩はなくなること、第三に「臨場感」、そして第四に研究者の「勘」を挙げている。たしかにこれらは科学者にとって重要な条件なのであろうが、それが深海科学および科学技術の発展にとってどの程度必要なのかということも検討しなければならない。多くの海洋研究者は有人潜水船に自らが乗って調査研究することを希望している。現用の有人潜水船にいったんトラブルがあれば、日本の海洋研究に支障をきたすことは明白である。しかし、研究者が建造を希望しても、自ら建造を担うわけにはいかない。開発予算がなければメーカーは建造することができず、時間が経ちすぎれば建造技術の維持すら困難になる。

第 3 期科学技術基本計画の国家基幹技術に「有人潜水船の開発」は国家基幹技術の一項目として掲げられているが⁶⁾、今のところ、

文部科学省の次世代深海探査技術には採用されていない⁷⁾。

しかし、人類にとって有人潜水船は必要なのかどうかを検討しなければいけない時期はまもなくやってくる。人類にとって海洋研究は必要であることは間違いないかもしれないが、我が国にとって有人潜水船は必要なのか、建造技術の開発は必要なのか、これまでの有人潜水船のあり方でいいのか、新しい世代の有人潜水船とはどんなものなのか。このような基本的なこと

は、現時点でも検討しておかなければならない。

現在の有人潜水船が開発建造され運用を開始したころは、無人探査機の技術は未熟であった。しかし近年では深海における無人探査機の活躍と技術開発には目覚ましいものがあり、議論の背景は変わりつつある。有人機と無人機にはそれぞれ得失があり、技術開発および運用の観点から役割分担を明確にしなければならない。米国でも同様の議論がなされている⁸⁾。

本レポートでは、米国と中国における深海有人潜水船の開発動向を見比べながら、我が国の進むべき道を検討していきたい。ただし、海外が開発するから日本も開発すべきと提言するのは安易すぎる。本レポートでは、有人潜水船の進化の過程をまとめ直し、これらも参考にして、次世代の有人潜水船像に関して我が国の進むべき道を検討したい。

2 深海への挑戦の歴史

2 - 1

深海は暗黒なのか

人類が海中や海底の様子を科学的に観察するようになったのはそれほど昔のことではない⁹⁾。19世紀半ばにイギリスで水槽が発明されるまで、海生生物の絵といえ、ほぼ例外なく、魚やクジラが水面上で泳ぐ姿か、浜に横たわり干からびた状態で二枚貝や巻貝などの軟体動物が描かれていた¹⁰⁾。海中で生物がどのようにに生息しているのか、想像すらできなかったのである。大深海に生物が活着していることは信じられなかったし、海洋底地殻が大深海の裂け目で産みだされていることも、とうてい信じられることではなかった。19世紀の中頃まで、深海は高压であり、暗黒であり、生命は存在できないはずであると考えられてきた。

しかし、長いチェーンの先にドレッジという器具をつけて海底をひっかいて引き上げてみると、驚くほど多様な生物が存在するらしいことがわかってきた。19世紀末には、英国の軍艦「チャレンジャー」が深海に初めて科学のメ

スを入れる航海を行い、深海生物やマンガンノジュールを発見している。20世紀初頭には、欧州の大国が海洋調査を行い、現在につながる海洋科学の基礎が築かれていった。第二次世界大戦前後からは、米国が中心となって、水中音響技術やエレクトロニクスなどの科学技術が海洋調査に応用され、海洋科学は大きく発展しはじめた。

2 - 2

「深海の船」のはじまり

1930年、米国の生物学者ウィリアム・ビービーは直径約1.4mの鉄球(バチスフェア)に乗り、ワイヤーロープに吊るされて、428mの深度に到達した。彼は深海魚などの多様な生物を肉眼で初めて観察した人物であり、1934年には908mの深度にまで達している。しかしこの鉄球は重さが2.5トンもあり、浮力を引いても約1トンをワイヤで吊っていたため、つねに破断の危険があり、海中の観察者が自由に動き回ることはできなかった。この時代の有人潜水器は「第0世代」と呼ばれる。

次に、なんとか動きまわれる

ものを造ろうと挑戦がなされ、「第一世代有人潜水船」が開発された。人類として初めて気球で成層圏に達したことで知られるスイス人の物理学者オーギュスト・ピカールは1947年に、気球の原理を応用して「深海の船(バチスカーフ)」を発明した。これには人間が乗る直径2mの耐压球に浮力をあたえるため、大量のガソリンを詰めたタンクが取り付けられていた。また、この第一世代はスラスト(移動用の推進機)を装備して海中を動き回れるようになっていた。この技術を応用して米国海軍は1万m級のバチスカーフであるトリエステ(Trieste)を建造し、1960年、マリアナ海溝チャレンジャー海淵において、10,906mの潜航を記録している。この記念すべき潜航にはオーギュストの息子であるジャック・ピカールと米国海軍のドン・ウォルシュが乗船している。またフランス海軍も同様のバチスカーフであるアルシメード(Archmede)を建造し、こちらは1962年、日本海溝や千島海溝で最大9,545mまでの潜航を行っている。これに乗船した北海道大学の佐々木忠義は、海面付近で作

られた生物の遺骸が深海に沈降していく様子を観察し、これをマリンスノーと命名した。

バチスカーフは海中を「自由」に動きまわれるようになったとはいえ、浮上するための余分も含めて、100 m³以上のガソリントankを装備しており、4トンの船体のために75トンもの浮力材が必要だった。空中重量は80トンを超えていたはずである。したがって取り扱いが困難かつ危険で、また海中での動きも鈍重だった。しかしともかく、動きは鈍くとも1万m級の大深度潜航を達成したのが、第一世代有人潜水船の特長である。

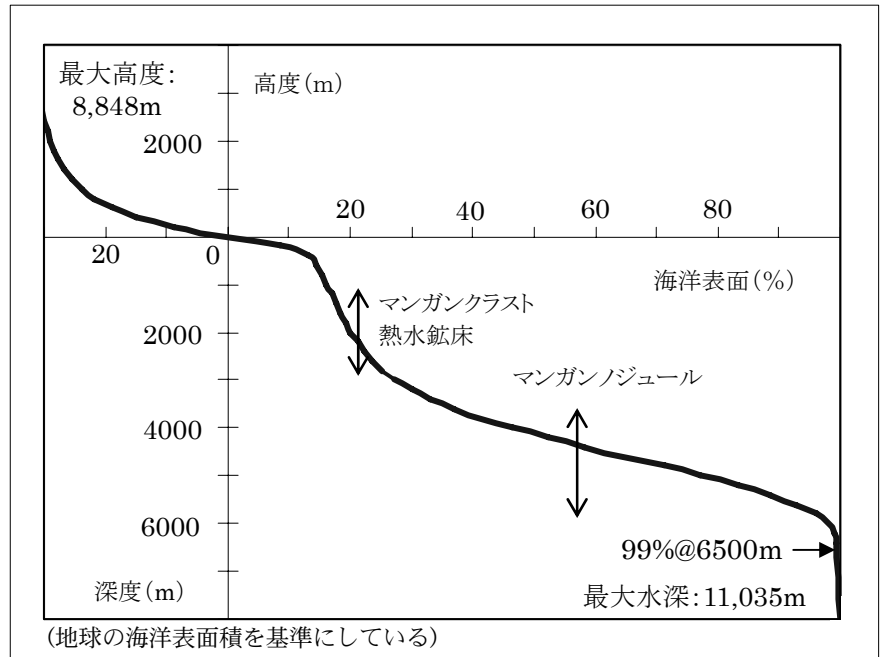
2 - 3

深海調査の発展期

第二世代の有人潜水船では、海中での運動性能を重視して開発が進められた。この世代の基本技術は、浮力材の開発、人間が居住する耐圧殻の軽量化、海中で動きまわるための動力源の改良、そして安全対策技術の確立であった。有人潜水船は海中での重量を調整して上昇下降する。基本的には海水より重くなるように造り、浮力材を大量に取り付けて海水よりも軽くする。沈降するために錘を搭載し、海底付近で錘の一部を投棄して浮きも沈みもしない中性の浮力とし、スラストの力で作業に必要な上昇下降を行っている。作業が終了すれば残りの錘を投棄して浮上する。浮力材は、この間にどんなことがあっても潰れないものが要求される。

1964年に米国に初代アルビン (Alvin) が登場した。建造時の最大潜航深度は1,800 mであった。浮力材としては、ガソリンに代えてシタクチック・フォーム (syntactic foam) が開発された。これは数十 μ mの大きさのガラス球を樹脂で固めて成型したもので

図表1 地球の標高と深度の分布割合と海底鉱物資源の分布範囲



ある。重量が15トン程度の小型軽量の潜水船が開発され、従来は現場まで曳航していった潜水船を専用の母船で目的地まで運搬できるようになり、現場で潜水船を降ろして揚収するという運用スタイルが確立していった。

これらの技術開発により、科学研究用の有人潜水船の行動範囲と運用効率が飛躍的に向上した。第二世代の有人潜水船としては、現在までに、米国の現アルビン (最大潜航深度4,500m、ウッズホール海洋研究所が運用)、日本の「しんかい2000」(2000m級、2004年に運用休止し引退) や「しんかい6500」(最大潜航深度6,500m、(独)海洋研究開発機構が運用)、フランスのノチール (Nautilus, 6000m級、フランス国立海洋研究所IFREMERが運用)、さらにロシアのミール (Mir, 6000m級) が活躍している。

この世代になると、有人潜水船は最大潜航深度を競うよりも科学調査や資源調査に視点が移ってきた。世界の海洋の95%以上をカバーする科学調査が可能になると、また将来の開発が期待されたマンガンノジュールが4000～

6000 mにあることから、多くの潜水船の最大潜航深度は6000m級に設定されている (図表1)。

現在活躍している世界の主な深海有人潜水船の性能概要を図表2に示す。「しんかい6500」は1980年代に世界の国々が6000m級の有人潜水船を開発しているさなかに建造された¹¹⁾。1970年代にも提案はされていたが、技術の実績も無しにいきなり建造することはリスクが大きく、建造技術と運航技術を確立するために、まず「しんかい2000」が開発建造された。これで得られたノウハウと、チタン製の耐圧殻の製造をはじめとする技術の進歩をもとに、80年代に最大潜航深度6500mの有人潜水船が開発建造され、90年に運用を開始、91年から調査潜航に投入された。安全な運航のために、パイロットと研究者が耐圧殻から海中を覗くアクリル樹脂の窓¹²⁾、深海と海上の母船とをつなぐ水中通話機、光では10mほどしか見通せない海中で障害物を探査する音響観測ソナーなど、当時までの種々の先端技術が結集された。

2 - 4

深海有人潜水船の成果

第二世代の深海有人潜水船が運用されるようになり、多くの科学および科学技術の成果が上げられてきた。

資源調査の分野において、熱水鉱床は太平洋の中央海嶺で相次いで発見されていたが、大西洋中央海嶺ではなかなか発見されなかった。しかし、1986年、アルピンに乗船した科学者が大西洋中央海嶺のTAG海域^{注1)}においても熱水鉱床を発見した。1991年には、ロシアの有人潜水船ミールに乗船したロシアと米国の科学者は、大西洋で最大規模の熱水鉱床を発見してミールと名づけた。その後も熱水鉱床は多数発見されてきた。深海生物研究の分野では、1992年に日本の科学者が「しんかい6500」に乗船し、鳥島海域4,146mで鯨の骨とこれに付着した貝やエビを発見した。1994年にロシアの科学者は大西洋におい

図表2 世界の主な深海有人潜水船

船名 (保有国)	Alvin (アメリカ)	Nautile (フランス)	Mir 1&2 (ロシア)	しんかい 6500 (日本)
最大潜航深度 [m]	4,500	6,000	6,000	6,500
可潜航海域 [%]	62%	98%	98%	99%
潜航数 / 年	180	100 - 115	不定期 (低)	60
研究者 / 乗員	2 / 1	1 / 2	総員 3	1 / 2
海底活動時間 [hr]	4 ~ 5	5	10 ~ 15	4
ペイロード [kg] *	680	200	250	150
球殻内容積 I [m3]	4.07	4.84	4.84	4.19
観測方向	横 / 下	前 / 中央	前 / 中央	横 / 下
建造年	1964	1985	1987	1987

*ペイロード：科学研究のために研究者が持ちこめる機材や採取したサンプルの総重量

て熱水性の生物を多数発見した。また 1995 年には、日本の研究者が奥尻島沖で深海系の化学合成生物群を発見した。深海地質の分野では、「しんかい 6500」が日本海溝 6200 m の斜面に裂け目を発見するなどの成果を上げている。

緊急事態への対応も多数行われてきた。1966年には、初代のアルビンがスペイン沖914mで米軍が紛失した水爆の引き上げに成功

した。1986年のスペースシャトル・チャレンジャーの事故では有人潜水船3機と無人機1機によって、50トンの破片を回収した。さらに1989年に旧ソ連の原潜クルスクが沈没した際には、ミールが海底堆積物を採取して放射性物質を測定し、放射能漏れを防ぐために船首部を密閉する作業を行った。

3 米国における有人潜水船の開発動向

3 - 1

米国における 深海科学の将来計画

米国の「深海科学に関する将来計画委員会(Committee on Future Needs in Deep Submergence Science)」が2004年に報告書「基礎的海洋研究における有人潜水船および無人探査機(Occupied and Unoccupied Vehicles in Basic Ocean Research)」を刊行した⁸⁾。同書は、今後の米国が国家として深海科学^{注2)}の調査研究にいかに取り組むべきかをまとめたものであり、必要となる有人潜水船や無人探査機などの深海

潜水機のあり方についても検討している。その後の米国は、この委員会の勧告にしたがって、有人潜水船として現用のアルビンの後継潜水船を開発し、また無人探査機として11,000m級のハイブリッド機(有索と自律型の二つのモードを合体させた無人探査機)を開発している。

同委員会は、科学研究を代表

する NSF（国立科学財団）、海洋調査プロジェクトを代表する NOAA（国立海洋大気機構）および米国海軍の要請で設置された。委員会の検討目標は、深海科学の将来像と必要とされる設備を評価し、また深海および海底における基礎研究を支援する技術の可能性を評価することであった。検討された具体的な内容は、

■ 用語説明 ■

注 1 **TAG (Trans-Atlantic Geotraverse)**：世界最大級の熱水マウンド、水深3600 mに直径200 mの円錐台に高さ20 mほどのブラックスモーカーが林立している

注2 深海科学 (Deep Submergence Science)：本レポートでは、有人潜水船や無人探査機などにより深海および海底を潜航調査して得られる知見に基づいて構築される科学、と定義されている。

下記の事項である。

- (1) 現用および検討中の有人潜水船および無人探査機の性能を評価すること。
- (2) 世界標準の深海科学研究を継続して実行するため、調査機器をどのように組み合わせるかを提言すること。
- (3) 将来の研究ニーズにこたえる調査機器として組み込むべき革新的な設計概念および新技術を検討すること。

新たな施設の開発についての検討結果は、以下の4つの提言としてまとめられた。

(提言 1)

NSF 海洋科学部は新たに科学調査研究用の無人探査機を建造すべきである。これにより多数の利用者、多様な研究分野、海洋地理の調査活動に資する深海潜水機を増やすことができる。

(提言 2)

NSF 海洋科学部は新旧無人探査機の定期点検や改造に要する移動時間を最小にするよう新無人探査機の配備場所を検討すべきである。

(提言 3)

海底の探査には無人探査機が最適であり、またコストとリスクを考えれば、6500 m以深の調査に有人潜水船を利用することはできないが、人間による調査は国の海洋学的調査にとって要となっており、有人潜水船による直接観測で可能となるものがある。しかし現用のアルビンは多くの科学研究の要求にこたえられなくなっている。したがって NSF 海洋科学部は新型の機能を向上させた有人潜水船を建造すべきである（ここでいう機能

向上とは、視界性能の向上、中性浮力調整機能、パイロードの増大、作業深度における滞在時間の増大、その他である）。

(提言 4)

したがって、大深度（6000 m 以深）に潜航できる有人潜水船を建造するのであれば、設計段階でコストとリスクを大幅に増大させないことが実証された場合にのみ限るべきである。

3 - 2

新型有人潜水船の建造方策

上記の「深海科学の将来計画」の提言に基づき、新型有人潜水船の具体的な建造方策が検討されることになった。この提言に至るまでには 1999 年より、米国ウッズホール海洋研究所 (WHOI) が中心となり、新型有人潜水船が検討されてきたことも詳細に説明されている。途中の過程では、全海洋に潜航可能な 11,000 m 級の全深度有人潜水船も検討されたが、全深度有人潜水船を数年内にしかも限られた予算で設計建造することは不可能であり、圧力が 6000 m 級の 2 倍になれば潜水船重量も相当なものとなり、現用の母船の能力をはるかに超えることが明らかとなった。さらに、この深度で健全な浮力材、バッテリー、電子機器を製造することや、人間がこの深度に耐えられるのかということも不透明であり、たとえそれらが可能であっても、それを実証する試験設備がないという問題もあった。これらの理由から全深度有人潜水船は検討対象から除外されることになった。一方、現用の 4500 m 級アルビンを 6000 m 級に改造するという案も検討されたが、深海科学のニーズを十分満足させられないと判断され、最終的に、費用的にも許容範囲で建造可

能とされた新型有人潜水船が推奨された。新型有人潜水船に追加すべき機能として、具体的には以下の 5 項目が挙げられた。

- ① 可変バラスト装置の性能向上：海洋中層に浮遊して調査するためには、浮力と重量のバランスを継続して調整できなければならず、新型有人潜水船にとって最重要課題である。
- ② 水銀を用いない姿勢制御装置の開発：現アルビンは水銀を前後に移動させることによって姿勢を調整しているが、環境への配慮から水銀を用いないことが望まれる。
- ③ 7000 m 級新型無人探査機と適合する電子機器・工具類：これらはプラットフォーム間での共通化にとって重要である。
- ④ 光ファイバーケーブルの利用：有人潜水船から連続データ通信（調査状況、他の研究者へのビデオ映像、操船データなど）を可能とし、またこのケーブルは船上からカメラや機器を制御するためにも必要である。
- ⑤ 船上ビデオカメラのための目標特定システム：眼の動きを追尾して目標物を特定したり位置出しをしたり追跡したりできるようにする。

次に人間の乗る耐圧殻について検討がなされた。これは新型有人潜水船のコスト評価にとって重要な項目である。米国で現アルビンが建造されたのは 1970 年代のことであり、これに使われたチタン球殻を製造する設備や溶接技術は、米国ではすでに失われており、現時点ではロシアと日本だけが技術的に可能である。現有のアルビンの耐圧殻を改造したりすることも検討された。これはコスト的には最も現実的ではあるが、潜航深度は現状の 4500 m に制限され、実質的には現状より能力が低下すると懸念された。以上の検討により、深度を増し、覗き窓の配置変

更などの科学調査能力も向上させるには、新しいチタン球殻を製造するのが望ましい方策であるとされた。しかし、米国における製造技術やコストをさらに検討評価して、製造可能であるという見通しが得られた場合に限り、6000 m以深の有人潜水船を建造すべきであると結論付けられた。

3 - 3

新アルビンの仕様と技術

米国の海洋関連の各機関は1999年以来、有人潜水船の必要性について検討を進めてきたが、最終的には2004年にウッズホール海洋研究所の研究者たちがアルビンの代替潜水船として6500m級の潜水船を提案した^{13, 14)}。現アルビンの調査能力を向上させたいという要求があったばかりでなく、米海軍が運用していた6000m級潜水船シークリフ (Sea Cliff, 1984年) が2001年に引退していたことから、アルビンを6500m級の潜水船として新替するという計画が採用されたと考えられる。

新アルビンの仕様を現アルビンと比較して図表3に示す。また新アルビンの予想外観を図表4に示す。新アルビンの設計課題と概念設計結果は以下の(1)～(8)のようになった。

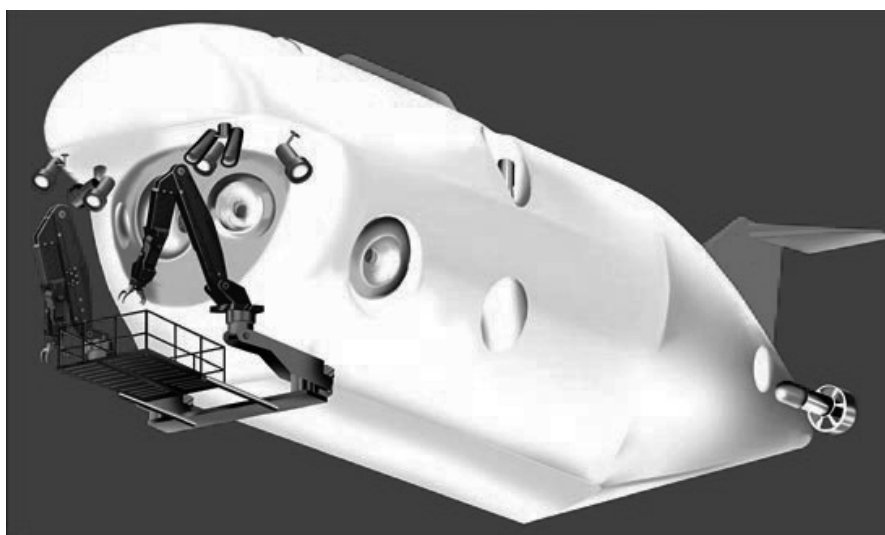
(1)最大潜航深度

最大潜航深度は最も重要な設計パラメーターである。米国でも、日本の「しんかい6500」検討時と同じような議論が行われ、目標は地球上の海底の99%に到達可能な6500mとされた。技術的な限界としても、6500mまでは信頼して使用可能な軽い浮力材があるが、これを超える深度では浮力材の比重が大きくなって船体が大きく重くなるため、操縦性が悪くなるとともに現在の支援船が利用で

図表3 新現アルビンの仕様比較表

	新 Alvin	現 Alvin
深度 (可潜域)	6500 m (99%)	4500 m (63%)
寸法 (L*B*D)	ND (現 Alvin 以下)	7.3*2.6*3.7 m
重 量	18 ton	17 ton
球殻材料	Ti 6 Al 4 V - ELI	Ti 621/0.8 Mo
球殻内径 / 容積	2.10 m / 4.84 m ³	1.98 m / 4.07 m ³
窓 数	5	3
乗員数	操縦者 1、科学者 2	操縦者 1、科学者 2
潜航活動時間	10.5 H	約 9 H
推進装置	前後・垂直 2、水平 2	前後・垂直 2、水平 1
速力 (前後)	3 kt	2 kt
速力 (上下)	44 m/min	30 m/min
トリム角	± 15°	± 7.5°
ペイロード	181 kg	125 kg
位置制御	自動位置・方位制御	手動&方位制御
電池容量	約 115 kWh	35 kWh
下降・上昇方法	海水バラスト	鉄ドロップウェイト

図表4 米国の「新アルビン」の概観図



Woods Hole Oceanographic Institute HP より、2007 年 5 月 7 日版

きなくなるという問題もあった。

(2)耐圧殻

耐圧殻にはパイロット 1 名と科学者 2 名が乗りこみ、潜水船を操縦し、観察し、試料などを採取する操作を行うスペースが必要である。このため現アルビンより内径を6.3%大きくして、容積を増大させた。これにより居住性が改善され、内部電子機器や持ちこみ機器のスペースが確保された。

球殻の材料はいくつか検討されたようである。ロシアの潜水船ミールに使われている超硬度鋼

(maraging steel) はニッケルを多く含んだ鋳鋼であり、強度はチタンに匹敵するものの、海中での腐食に弱いという欠点がある。米国の潜水船アルビンとシークリフの球殻に使われていた 611 チタンは現在では一般に使用されていない。最終的には、日本の「しんかい 6500」とフランスのノチールに使用されて長い実績のある 6-4 チタン (Ti6Al4V-ELI: チタンに 6 % のアルミニウムと 4 % のヴァナジウムを含む合金、ELI は金属内に酸素が非常に少なく溶接に優れている) が選定

された。

覗き窓は従来の3つから5つに増やされている。前方の3つの覗き窓は、中央のパイロットと左右の科学者が共通視界をもてるように近接して配置された。側方の2つの覗き窓は科学者に邪魔をされずにパイロットが側面を見ることができ、観測を犠牲にすることなく安全に操船することができるようになった。

(3)浮力材

浮力材は深海において潜水船の浮力を確保するために必須の部材であり、また潜水船の重量と大きさを決定する支配的な因子である。現アルビンの浮力材の比重は0.577であり、新潜水船には大きすぎるとされた。無人探査機用に開発された浮力材は比重が0.481となっており、これが設計時点において6500mの深度で使用できる最軽量のものではあった。その後、比重0.481の浮力材の開発は完了して、さらに軽量化が進められている。

(4)可変バラスト

バラストとは船舶に重石として積みこむ水などのことであり、有人潜水船でもバラストタンクに水を出し入れして重量を調整する可変バラストシステムが用いられている。目的とする機能は、①下降と上昇のために、大きな重量と浮量を得る、②潜航中に試料採取して変化した重量を相殺させる、③下降上昇の速度を大きくするためトリム角（前後傾斜姿勢）を調整する、という3つである。

バラストタンクの内部は1気圧に保たれ、6500 mの圧力に耐えられるようチタン球で造られる。所要の海水を満たして潜航し、潜行中は2台のポンプで海水を出し入れする。これにより、潜水船は任意の中間深度で停止して観測が可能になる。トリム角による下

降上昇速度は15度で毎分30 m、25度で毎分約45 mと試算されている。毎分45 mの速度であれば、6500 mの海底まで2時間半で到達可能になる。なお、潜水船をこのトリム角にするため、バラストだけでなく、電池と重りを前後方向に移動させることになっている。この重石は緊急浮上のためには投棄できる。

(5)推進システム

潜水船を前後左右に移動するために高度な推進システムが装備される。推進器として電動スラスト計6台が配備される。前進後進のためのスラストが船体後部に2台、横方向の移動および左右への回頭のために船体の前部と後部に水平スラストが各1台、上昇下降の運動のために垂直スラストが船体中央部の左右舷の各1台である。これらを操縦することにより、特定の位置や方位を維持し、深度や姿勢を保持することが可能となる。これらの位置保持操縦システムは、無人探査機用に開発されたものが使われている。

(6)動力源

動力源としてはリチウムイオン電池がエネルギー密度および寿命の観点から最良であるとされた。なかでもリチウム高分子電池はオイル均圧容器に収納できる特長があり注目されている。この種の電池は自律型の人工知能海中ロボットですでに使用されており、5年以上の寿命があるとされている。なお、燃料電池は開発途上であるとして、検討対象からはずされた。

(7)安全対策

安全面の対策は米国の船級規則に準拠している。緊急時に投棄可能なマニピュレータや錘、絡み危険を最小にすること、ライフサポート能力の増強、などの規定が

ある。新潜水船は上昇下降を可変バラストによって行っており、このポンプと電池に故障があった場合の備えとして緊急上昇用の投棄重量があり、十分な浮力が確保される。また、潜水船の非常回収装置が支援母船に装備される。

(8)科学調査用の機器

マニピュレータやさまざまな科学調査機器の動力を供給する油圧システムは、定格20.7MPa × 9.5 l/min となり、現アルビンの90%以上の性能アップとなっている。マニピュレータは2台、伸び縮み可能なベースに取りつけられている。中央に大きなサンプル用のバスケットがあり、左右舷に旋回式のバスケットがある。TVカメラは高解像度のズーム付きが2台あり、二人の観測者がコントロールでき、高品質の映像が得られる。ほかにパノラマTVカメラ、マニピュレータに装備される小型カメラ、照明は高出力のHMIライトと小型キセノンランプの組み合わせとなっている。キセノンランプはウォームアップなしに点灯・消灯できる特長があり自由度が高いものである。下方監視のためには、海底調査用ソナーが装備されている。

潜水船と支援母船は音響モデムにより通信を行う。音響モデムの通信速度は7000bpsであり、標準画質のjpeg画像を8秒で送信できる。画像が船上で受信されると、専用コンピュータにより圧縮データが解凍され、船上のネットワークで利用可能となる。また潜水船と母船は光ファイバ細径ケーブルで結ばれており、船上とのあいだでリアルタイム通信ができ、船上の科学者も調査に参加・協力できる。衛星通信を利用すれば陸上からの参加も可能となるため、海洋研究を教育などにも利用でき、国民の科学技術への理解増進に使うことも期待されている。

3 - 4

新アルビンの 建造スケジュール

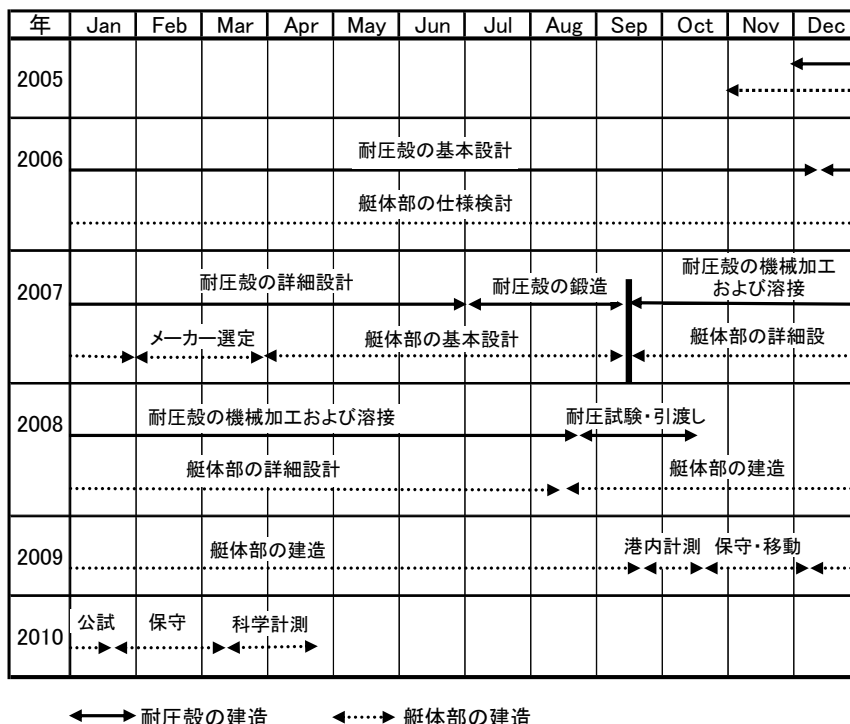
新アルビンは2005年秋に建造が開始され、2007年秋に第一期から第二期に移行する段階に入る。第一期には耐压殻の設計と艇体部(耐压殻以外の潜水艇体)の基本設計が行なわれた。第二期では建造メーカーが決定され、耐压殻は加工と溶接および耐压試験に移り、艇体部は詳細設計と建造に移ることになっている(図表5)。

3 - 5

米国における 有人潜水船の位置づけ

米国は、深海科学の研究を進めるために、有人潜水船と有索・自律型の無人探査機を総合的に運用していくという基本方針に立ち、開発建造計画を進めている。有人潜水船は6500m級の新アルビンを建造し、無人探査機は11,000m級のハイブリッド型システムを開発している。無人ハイブリッド型システムは、探査目的に応じて、広範囲のマッピングなどは自律型の人工知能海中ロボットモードで、ピンポイントで

図表5 米国の代替有人潜水船の建造スケジュール (2006年9月25日版)



参考文献¹⁵⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

詳細な調査をするときには遠隔操作型の無人探査機モードで運用するものである。

米国は、無人探査機の開発では浮力材としてシームレスのセラミック中空ボールを使うなど新技術に挑戦しているが、有人潜水船は従来の深海科学技術の集大成として建造している。有人潜水船と無人探査機が並行して開発が進められており、特に有人潜水船では新技術の開発に挑戦している期

間的な予算的な余裕がないことがその理由である。無人機の開発で得られる新たな技術が有人潜水船にフィードバックされることはない。

このような点で、米国が建造中の有人潜水船は、海洋の中層に浮揚して生物生態調査ができるようになり、また比較的に高速潜航浮上が可能となっているものの、基本的なコンセプトは第二世代の枠組みを超えてはいない。

4 中国における有人潜水船の開発動向

4 - 1

7000m有人潜水船の概要

中国の新華社通信が2007年2月2日に配信した記事によると、「中国は独自開発の7000m有人潜水船(中国語名称: 中国7000米载人潜水器、略称: 7000m有人潜水船)を2007年に進水する」と発表した(図表6)。こ

のプロジェクトは第10次5ヵ年計画(2006~2010)における「国家ハイテク技術研究開発計画(通称“863計画”)の一環として実施されているものである。2006年9月にはすでに組み立て段階と発表され、上記計画期間中に潜水艇の海上実験を完了する予定とされていたが、今回の記事では「世界の海底の99.8%をカバーできる潜水船を中国が

開発し、2008年の竣工を目指している」と発表されている。

4 - 2

7000m有人潜水船の性能

この潜水船は中国国内で組み立てられるが、ロシアが耐压殻とライフサポートシステムを担当しており、建造費は1.8億元(約30億円)とされている。その性能は以

下の(1)～(5)である¹⁶⁾。

(1)世界の海の99.8%が潜航可能

図表7に中国7000m有人潜水船と「しんかい6500」の仕様を比較して示した。中国の有人潜水船の最大潜航深度は7000mであり、これによって可潜航海域は世界の海の99.8%となる。「しんかい6500」は最大潜航深度6500mであるため、可潜航海域は98%である。艇体の大きさは「しんかい6500」より、わずかに太くて短い。重量は「しんかい6500」よりわずかに軽いが、ロシアのミールの18.6トンよりはかなり重い。着水揚収装置がミールのように舷側ではないため、「しんかい6500」と同様の大きさと船尾配置となることが予想される。

(2)耐圧殻はロシア製

パイロット1名と科学者2名の居住空間となる耐圧殻は、内径が2.1mの6-4チタン合金製であり、板厚が76～78mm、完成半径のぶれは±4mmとされ、真球度は0.4%以下とされる。「しんかい6500」では、内径が2.0mのチタン合金、板厚が73.5mm、直径の誤差は0.5mmとされているので、真球度は0.025%となっている。「しんかい6500」に比べ、直径が5%大きくなっているのに板厚は3%程度しか大きくなくなっておらず、また真球度はより悪くなっているのにもかかわらず潜航深度が8%も大きくなっている。

文献³⁾によると、耐圧殻を製造するのはロシアのメーカーであり、6000m有人潜水船ミール(ニッケル鋼製)や2000年ころに新しく建造された6000m有人潜水船コンサル(Consul:チタン合金製)の実績がある。耐圧殻の製造方法は天板に6枚の側板をTIG溶接^{注3)}し、熱処理のうえで機械加工により研磨して半球を二個

図表6 中国7000m有人潜水船の模型



中国7000米载人潜水器模型
北京日報、2007年1月31日より転載

図表7 中国7000m有人潜水船の基本仕様

	中国7000	しんかい6500
潜航深度[m]	7000	6500
観測者／乗員	2／1	1／2
全長[m]	8.2	9.5
全高[m]	3.4	3.2
全幅[m]	3.0	2.7
空中重量[ton]	25.0	25.8
球殻材料	チタン合金	チタン合金
球殻内径[m]	2.1	2.0
窓径[mm]		
中央窓：1	200	120
側方窓：2	120	120
生命維持[H]	84	128
最大速度[kt]	2.5	2.5
ペイロード[kg]	220	200
電池		
種類	酸化銀－亜鉛	リチウムイオン
容量[kWh]	110.0	86.4
海中作業[H]	6	4

造り、これをさらにTIG溶接して球にしている。耐圧試験もロシアで行われ、深度7000mの1割増になる7700mの水圧を1時間、7000m水圧を8時間連続、さらに潜水船の下0～7000mの昇圧・降圧を6回繰り返す、いずれも問題なしとされた。

耐圧殻にある観察窓は円錐台形状となっており、中央窓は内径20cmのものが1つ、側方窓には内径12cmのものが2つある。中央窓は「しんかい6500」の12cmよりかなり大きく、ロシアのミールと同型であり、側方窓は「しんかい6500」やアルビ

ンより前方寄りに配置されている。この設計はパイロットと科学者が前方にある目標を同時に観察しながら操船できる利点がある一方、側方の危険物がわからなくなり、安全性が低くなるとも言われている。

■用語説明■

注3 TIG溶接：熱に強いタングステン電極を使い、溶接部をアルゴンなどの不活性ガスで覆うため材料が酸化されず、ステンレスやチタン合金の手溶接に適している。

(3) スマートな推進操縦

有人潜水船には、前進・左右上下回頭のために、いくつもの推進機が配置される。中国 7000 m 有人潜水船は、船尾をすばませた涙滴形状となっており、4 枚の尾翼が X 字形に取りつけてある。この尾翼のあいだに 4 基の主スラストをすばませるように傾斜させ固定しており、4 基のスラストは可動ではないが、各スラストの推力を合成することにより、前後だけでなく横方向、あるいは縦方向の回頭力が得られる。この主推進機方式はロシアのミールと同じ設計思想であり、大型の主推進機を左右に振らせて回頭させる「しんかい 6500」とは異なる。また船体前方にはサイドスラストがとりつけられている。船首上部に水平スラスト 1 基（ノチールや「しんかい 6500」と同様）、船体両側に上下・左右の回頭および推進補助のスラスト（ミールや「しんかい 2000」と同様）、横方向の平行移動は船首の水平スラストと船尾左右のスラストの合成、上下移動は船首サイドスラストと船尾上下スラストの合成によるとされる。

(4) その他の技術

バッテリーは酸化銀・亜鉛電池を用い、容量は 110kWH（110V、800AH）であり、「しんかい 6500」より約 30% 容量が大きい。これにより海中における最大連続潜航作業時間が 6 時間となり、「しんかい 6500」より大幅に長くなっている。海底で試料を採取するためのマニピュレータは 7 自由度の関節をもつものが左右に一对取り付けてある。また母船とのあいだで画像の伝送ができるとされているが、伝送速度は 80kbps（通常のインターネットで 100Mbps）で、カラー画像を転送するのに 30 秒くらいかかることになる。浮力材としては、英国製のシタクティックフォームを使う予定であり、かなり小さなガラス球を樹脂で固めたものを使うとのことである。

4 - 3

中国における 有人潜水船の意義

大深度有人潜水船の中核技術は、耐圧殻と浮力材と動力源の

三点セットであり、このうえにさらに、操縦、観測、資料採取、安全など多岐にわたる技術が総合されて、初めて運用が可能となるものである。中国の有人潜水船の開発目的は軍事技術の取得が第一といわれ、海洋資源などの探索も計画されていると思われる。海洋科学への貢献はあまり感じられないが、今後の運用如何によっては間接的な影響を及ぼすことはあるだろう。技術開発の要素としては、ロシアに 6500 m より一段上の 7000 m の耐圧殻に挑戦する機会を与えたことが挙げられる。

有人潜水船のレベルからいえば、第二世代有人潜水船の最大潜航深度を世界一にするという目標は単純明快である。しかしながら、次世代の有人潜水船のあるべき姿を考えるうえで、科学のおよび科学技術的な側面においては、中国における有人潜水船から我が国が学ぶべきところはあまり無いように思える。

5 我が国における深海有人潜水船開発の今後のあり方・・・・・・・・・・

5 - 1

深海潜水調査船開発の歴史

我が国が有人の深海潜水調査船の開発に着手したのは 1965 年頃である¹⁷⁾。1963 年 10 月、海洋科学技術審議会に対して諮問が出され、海洋開発を国の施策として積極的に進めることとして、その基盤に不可欠となる海洋科学技術の開発の重点目標を定め、10 年程度の先を見通して 5 カ年計画を作成することになった。当時、すでに米国では幅広い研究開発により、

6000m 級の開発計画が進められており、米国では国内事情により実現されなかったものの、我が国では諮問への答申として潜水調査船の目標深度が 6000m とされたのである。この深度であれば世界の海洋の 95% 以上をカバーでき、当時、将来開発が期待されていたマンガン団塊は 4,000～6,000m に多く存在していたからである。必要とされた技術開発課題としては、耐圧殻の構造・材料・工作法、浮力材、動力装置、位置計測装置、各種の調査研究機器などとされ、また高圧試験用の水槽を建

設することも必要とされた。

深海潜水船の必要性について、この時期に研究開発を推進した岡村氏の考えは¹⁸⁾、「海洋開発は広範囲の科学技術を総合したシステム工学的な取り扱いがとくに重用であり、各種の科学や機器の開発技術を一つの目標に向けて最適化されたシステムとして開発していかなければならない。我が国の海洋科学は高い水準にあるとはいえ、海中の科学技術に関しては、十分な調査が行われておらず、知識は少なく、これから開発していかなければならず、したがって深

海潜水船は、海洋開発のなかで最も遅れている深海という分野の窓を開けるものであり、今後の海洋開発の基礎になる」というものであった。

1970年、船用機器開発協会のなかに「6000m級深海潜水調査船の開発研究委員会」が設置され、造船会社と共同で5年間にわたる研究開発が始められた。これによって6000m級深海潜水船の開発にとって中核となる球殻の圧壊のメカニズムが解明され、設計方針が確立された。これらの成果が、後の「しんかい2000」や「しんかい6500」の開発に大きな役割を果たしたとされている。

「しんかい6500」の開発では最大潜航深度が6000mから6500mに変更されている。三陸沖地震の震源が日本海溝の水深6000～6500mの海域にあることが指摘され、6500m以上とされた。しかし耐圧殻の安全率は「潜航深度の1.5倍+300m」とされており、これによれば6700mとなる。また各種機器の規格は水深6700mくらいであり、耐圧試験によれば6500mを越えるあたりで不具合が多くでるものがあり、最大潜航深度は最終的に6500mとされたものである¹⁹⁾。

5 - 2

我が国における有人潜水船の運用と成果

有人潜水船の成果を検討するときに注意しなければならない点がある。「有人」の成果と「有人潜水船」の成果とがいまだ渾然一体となっていることである。近年まで、潜水調査機はすなわち有人潜水船であったからである。現在なら無人探査機でも成果をあげられるものも多数あることもたしかである。しかし生物の行動や地形の異常などの発見は科学者の気づき

によって追跡調査して得られたものが多くあることに留意する必要がある。またこれまでの有人潜水船は海洋中層に浮遊できないために、この分野の成果があまりみられないが、これは今後の課題とされるものである。

「しんかい6500」は1990年6月の初潜航以来、図表8のような潜航行動と成果を挙げてきた。三陸沖の日本海溝において世界最深の冷水湧出帯に生物群集を発見、高圧環境を好む新種的好圧菌を深度6500mで発見、プレートの沈み込みで生じたと考えられる裂け目を世界で初めて確認など、世界最深の潜航能力を活かしてさまざまな成果をあげ、2007年3月には通算1000回の潜航を達成した。また日本近海に限らず、太平洋、大西洋、インド洋などの海域において海底の地形や地質あるいは深海に生息する生物などの調査を行ってきた。これらの調査の目的をまとめると、大きくは次の4つの分野がある。

(1) 地球の成り立ちの解明

現在の地球観では、海洋プレートが海嶺で生まれ海溝で沈み込むと理解されている。大陸は比較的に軽い花崗岩が主体であり、平均高度は840mほどである。海洋プレートは比較的に黒くて重い玄武岩からできており、深さはだいたい4000～5000mである。大陸と海洋は地形的に異なるばかりでなく、構造的にもまるで違うものである。海洋プレートの下にはマントルがあり、熱く軽い物質が対流のように浮き上がり、冷やされて重くなったプレートがマントルの底に沈んでいく。海洋の地殻と大陸の地殻がぶつかりあい、歪のエネルギーが蓄積され、これが一挙に解放されるとき巨大地震が発生する。このような地球内部の動きによってもたらされるさまざまな現象を海底で観測調査すること

により、地球の成り立ちが解明されてきた。

(2) 生物の進化の解明

陸地および海洋表層では、植物も動物も太陽エネルギーと炭素を基本にした生物群が主体である。しかし深海底には太陽エネルギーにほとんど依存せず、地球内部から湧き出してくる海水に含まれる硫化水素やメタンをエネルギー源として有機物を合成する化学合成細菌がいて、これに基づく生態系ができあがっていることが明らかにされてきた。これらの深海生態系を調べることで生物の起源や進化の過程が解明されてきた。

(3) 深海生物の利用と保全

人類が今後直面するであろう食料問題などに向けて、深海生物資源を持続的に利用し、多様な生理機能をもつ深海生物の遺伝子資源を研究することがますます必要になってくると言われている。

(4) 熱と物質の循環の解明

気候変動や海洋大気の変動など、地球をとりまく環境変動の歴史は海底に堆積したさまざまな物質中に記録されており、このような記録を採取し解読する研究が行われてきた。また海底の熱水活動により放出される熱や物質は、地球の環境に少なからず影響をおよぼし、さらに鉱物資源として濃縮されてきた。地球の環境変動の理解と海底鉱物資源の利用という観点での調査と成果は今後とも重要である。

運用頻度という点では、米国の潜水船アルビンは、初代が1964年に進水して以来4000回以上の潜航を行っており、年間約100潜航となっている。それに比べれば、「しんかい6500」の年間60回で計1000回の潜航は、少ないようにも思われる。これは、主として運用のコストと安全リスクの考え方

図表8 「しんかい 6500」による主な成果

1989年 8月	総合海上試運転にて潜航深度 6,527m を記録
1991年 5月	調査潜航開始（日本海奥尻海嶺、2,727m）
1991年 7月	三陸沖日本海溝にて世界最深（6,384m）の冷水湧出生物群集を発見 三陸沖日本海溝の海側斜面にて新種の好圧菌を発見（6,500m） 三陸沖日本海溝にてプレートの裂け目を発見（6,270m）
1991年 8月 ～ 11月	太平洋北フィジー海盆にて日仏合同調査 ・ 枕状溶岩の海底平原（1,970～3,900m）
1992年 6月	琉球海溝にて新種の好圧菌を発見（5,118m） 2003年に新種好圧菌のゲノム解析が終了、発見に伴う論文は多数
1992年 10月	伊豆・小笠原の鳥島沖にて鯨骨生物群集を発見（4,037m）
1992年 11月	マリアナトラフ熱水活動域にてアルビンガイ撮影（3,604～3,630m）
1994年 6月 ～ 11月	大西洋中央海嶺と東太平洋海膨にて調査潜航（MODE'94） ・ 大西洋中央海嶺 TAG 熱水マウンドにて大規模熱水活動の撮影、ブラックスモーカーに群がるツノ ナシオハラエビの大群（3,632～3,710m） ・ ガラパゴスハオリムシの撮影（2,634m） ・ 太平洋海膨にてユノハナガニの抱卵シーンを撮影（2,606～2,652m）
1995年 10月 ～ 11月	太平洋マヌス海盆にて潜航調査 ・ ホワイトスモーカーと金色のチムニーを撮影（1,708m）
1997年 6月	三陸沖日本海溝にて多毛類生物を発見（6,360m）
7～ 9月	東大平洋海膨にて海底長期観測（リッジフラックス計画）
1998年	大西洋中央海嶺と南西インド洋海嶺ほかにて調査潜航（MODE'98）
9月	有人潜水船としてインド洋で初めて潜航
10月	南西インド洋海嶺にて熱水噴出活動の兆候を確認（2,692m）
11月	南西インド洋海嶺にて新種の巨大イカを発見（1,055～5,362m）
1999年 8月 ～ 9月	ハワイ諸島周辺の海底火山調査潜航 ・ 海底火山ロイヒ周辺にて枕状溶岩撮影（2,460～4,821m）
2001年 12月 ～ 02年 2月	南西インド洋海嶺およびインド洋中央海嶺の潜航調査
2002年 7月	ハワイ諸島周辺の海底火山調査潜航
2002年 10月	インドネシアジャワ島南西沖調査潜航
2003年 11月	通算 800 回の潜航達成
2004年 5月	沖縄トラフにて堆積物中に液体 CO ₂ プールを発見（1,370～1,385m）
2004年 7月 ～ 9月	太平洋大航海「NIRAI-KANAI」調査の中核を務める ・ 東太平洋海膨にて世界最大の海底溶岩流平原を発見（3,024m）
2005年 7月	通算 900 回の潜航達成
2005年 12月	相模湾にて深海生物を生きたまま捕獲（1,215m）
2006年 1月 ～ 2月	インド洋中央海嶺の潜航調査、深海底の熱水活動環境においてスケーリーフットの生態を観測 （2,420～3,394m）
2007年 3月	通算 1000 回の潜航達成

参考文献²⁰⁾に基づいて科学技術動向研究センターにて作成

の違いによるものである。安全を重視すれば潜航コストは増大する。このような条件のなかで、通算1000回の潜航を大きな事故も無くに遂行できたことは、マネジメントやメンテナンスに不断の努力を惜しまなかった成果である。このような技術やノウハウは、個

人の学術業績やマニュアルではなく、組織に蓄積するものであることを深く理解しておかなければならない。

5 - 3

**第三世代の
深海有人潜水船への
キーワード**

我が国の「しんかい 6500」は第二世代の深海有人潜水船として

数々の調査研究成果を上げてきた。しかし建造以来、すでに20年が経過している。

これまでも数多くの機能向上が図られ、科学者の調査研究ニーズにこたえてきた。電池は当初、銀亜鉛電池が用いられていたが、メンテナンスの際に運航を休止しなければならなかったため、メンテナンスフリーで長寿命のリチウムイオン電池に換装されて、運用コストが軽減された。調査研究の機器として船外に設置されているTVカメラはCCDに換装され、画質の向上や重量軽減が図られた。目標物に光を当てる投光器はハロゲンランプからメタルハライドへ換装され、消費電力が軽減された。サンプルを入れるバスケットは大型にして収納容量が増加した。また潜水船から母船に画像を伝送する装置が開発設置され、母船から調査指示が行えるようになった。しかし、このような部分的な改良はなされても、総体としては20年前の設計による潜水船であり、老朽化にともなう故障は、今後ますます顕在化してくることであろう。我が国は、今まさに検討を開始しなければならぬ時期にきている。

潜水船の研究開発はいきなり動き出すことはできないものである。これまでの研究開発や運用によって得られた経験により、計画にも完成までにもそれぞれ数年の期間が必要である。米国の代替有人潜水船では、検討がなされてから3年後に建造が開始され、2年経過した現時点で3年後の完成が予定されている。計画が遅れる原因は技術課題ばかりでなく、多くの場合、開発予算であり、このことは世界共通である。

次世代の深海有人潜水船を考えるうえでのキーワードを以下に述べたい。これまでの有人潜水船の開発や無人探査機の開発、あるいは科学者たちの要望などを

踏まえ、キーワードとして「高速潜航浮上」「任意深度における中層での潜航」「長時間の潜航」「無人探査機とのシステム」の四つにまとめた。

まず、最大潜航深度は6000 m級であれば、今後も海洋地球科学および海洋開発ニーズに十分にこたえられるであろう。しかし、現在は深度6500 mに到達するには約2時間かかっており、往復のロスタイムが潜航可能時間の半分を占めている。これは、研究の効率ばかりでなく研究者の快適さの点でも問題である。これを短縮させ高速で潜航および浮上させるのが望ましいが、現状では動力を用いず、重くすることで自然落下で潜航していき、浮力でゆっくりと浮上するために、時間がかかっている。高速潜航浮上のためには動力を利用することが必要だが、そのためには大容量の電池あるいは動力源の開発を進めなければならない。これが長時間にわたる調査研究を実現するために核心となる技術開発であろう。また、現在の深海調査船は大きな重量で沈降していき、海底で中性浮力となり調査活動している。海底の地形地質や海底生物の研究にはこれで十分だが、大型の海洋生物の大部分は海中の中層に生息しており、そのような生物の研究には長時間にわたって海中に静止して追跡調査できなければならない。米国の新有人潜水船は中間深度での調査観測が可能となるように、可変浮力システムが採用され、鉄を投棄するこれまでの方式に比べ、調査エリアの環境悪化も防止でき、上昇下降や姿勢の制御などの能力も向上すると言われている。

第二世代とされる現在の有人潜水船は、科学者ばかりでなくパイロットも人間でなければならなかった。電子機器の発達

十分でなく、知覚し判断し制御する技術の大部分は人間の能力に依存しなければならなかった時代に製造されたからである。しかし現在では自律型の人工知能海中ロボットなどを含めて無人探査機が開発運用されており、高度な認識ツールや制御技術が進化している。これらの無人探査機の安全リスクは有人潜水船に比べればはるかに低く、浮力材などの耐压材料や燃料電池の応用、あるいは制御系の開発などで挑戦できている。当然、その開発成果は有人潜水船に応用することができるだろう。

また、これまでの有人潜水船は単独での行動を基本としており、必要とされるすべての機能を有人潜水船に保有していなければならなかった。しかし、次世代の有人潜水船では、それぞれ固有の機能をもつ多数の無人潜水機を従えたフリート（船団）として潜航調査することになるだろう。たとえばライトで照らす場合、潜水船から照らせば海中の懸濁物に反射して視界が悪くなってしまうが、ライトを持つ自律型の能海中ロボットが補助機能を果たせばよい。あるいは、動力源の電池をすべて抱えていく必要もなくて、専用の自律型海中ロボットが燃料補給してくればよい。それらを通信制御しながら、安全で効率的な調査活動を行うことが可能になれば、深海調査はより効率的に進められるであろう。これまで有人潜水船の必要性については、無人探査機や自律型の人工知能海中ロボットなどとの役割分担という観点での議論が主であったが、それらとのコラボレーション、一体となったうえでの役割分担という深海探査を展開できるシステム開発を目指すべきであろう。

6 おわりに

ニュートンが万有引力を発見して近代科学が始まったとされている²¹⁾。その発見に至る個々の事実は先人により発見され蓄積されてきたものである。地球が太陽をまわっていることも、月が地球をまわっていることも、そしてリンゴの実が木から地面に落ちてくることも、個別にはみな知られていることであった。1665年の秋の夕方、ニュートンが家の近くのリンゴ園を散歩していたとき、たまたま木からリンゴが落ちてきた。どの木から落ちてきたのだろうかと見上げると、その向こうにちょうど月が見えた。その瞬間、ニュートンのなかで月とリンゴがぴたりと重なり、それ以来ニュートンは、リンゴが地球の中心にむかってまっすぐ落ちるのに、どうして月は落ちてこないのかと悩みつづけ、ついに万有引力という統一理論に到達したとされている²²⁾。

科学は、多くの事実や現象のたゆまぬ積み重ねがあり、個々の仮説や理論があり、それらを統一して説明するさらに新たな仮説をたて予測を実証することにより革新的に進歩してきた。それができる優秀な科学者を育て新たなパラダイムを創りあげることができるよう、最先端の科学技術を提供しつづけることが国家の責務なのであろう。

海洋科学において深海有人潜水船の果たしてきた役割は絶大である。有人潜水船によって、深海が地球の最も大きな生物圏であることなどが次々と明らかにされてきた。このような調査研究は今後は有人潜水船ばかりでなく、有索の無人機や自律型の無人機などによってより一層明らかにされていくことであろう。海中や海底にいる鉱物資源や生物資源の探査ばかりでなく、地球科学における深海

の意味を解明するためには、さまざまな科学技術を並行して開発し、組み合わせて運用していかなければならない。

人間がわざわざ深海まで出かけていくことはない、高性能のTVカメラを搭載する無人機を開発すればいい、それが技術開発というものだと主張する技術者もいる。しかしカメラを通して見えるものと直接に目で見えるものとはまったく同じではなく、研究者の見たものを十分に、また追跡しながら見ることは、科学にとって大切なことであると考えられる。人類がどうやっても到達できない宇宙の彼方や、人間の肉眼では直接見るることのできない微小な世界を見えるようにするため、望遠鏡や顕微鏡を開発することは必要であり、そうやって科学は進歩してきた。しかし研究者に大深度での現象を直接に観察できるようにすることができるようになるまで、できるようにすることも科学の進歩のために重要であり、そのような努力によって科学技術はますます発展していくだろう。

有人潜水船を論ずるには三つの視点がある。これは科学技術一般にも共通することであるが、第一は深海科学への貢献、第二は科学技術の利用、そして第三は国民の納得であり、この三つのバランスをいかにとるかが深海科学技術政策の基本でなければならない。国家の基幹となる科学技術戦略は、国家利益を確保する手段を保持することであり、この手段を支える産業技術を維持発展させ、国家利益を享受する国民を説得できるものでなければならない。科学者個人の知的好奇心を満足させることが科学者の研究のモチベーションであるが、それを実現するためには、調査研究の成果を国民にもた

らし、説明すべき科学の課題を説明し、また科学者や科学技術者を惹きつけるフロンティアを提示していかなければならない。さらに国民はこのような科学技術政策を監視していかなければならない。

我が国の深海有人潜水船「しんかい6500」は世界でも最深部まで到達でき、諸外国はこれを越える深海調査・作業技術を懸命に開発してきた。我が国に深海技術の優位性があるうちに、次世代の深海有人潜水船を議論しなければならない。現状では困難とされる課題がどれほどあろうとも、大きな目標を掲げることができれば、優秀な人材が集まり育ち、科学と科学技術は進歩していくと著者は信じている。本稿によって、我が国は今後、どのように深海有人潜水船の開発に取り組むべきかという議論が開始されるきっかけとなることを期待している。

謝 辭

本レポートを作成するにあたり、(独)海洋研究開発機構の運用する「しんかい 6500」の技術開発や運用運航に携わる多くの同僚、また科学研究者および技術研究者から多くのアドバイスやコメントをいただきました。各位に心からお礼申し上げます。

参考文献

- 1) (独)海洋研究開発機構 HP
<http://www.jamstec.go.jp/j/>
- 2) 研究報告！深海 1500 メートルでの理科実験、Newton2007 年 7 月号、2007 年 7 月 7 日
- 3) 高川真一、インナースペース 地球の中を覗き見る、2007 年 6 月、東海大学出版会
- 4) パネルディスカッション「有人か、無人か?」、2004 年 1 月 16 日
<http://www.jamstec.go.jp/>

- jamstec-j/be_kaisaihoukoku/h16_pd.html
- 5) 藤崎慎吾、田代省三、藤岡換太郎、
深海のパイロット 6500mの海底に何を見たか、光文社、2003年7月
 - 6) 総合科学技術会議、第3期科学技術基本計画 分野別推進戦略Ⅷ フロンティア分野、2006年3月
 - 7) 文部科学省、次世代深海探査技術に関する研究開発計画、2006年6月6日
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/shiryo/018/06061408/008.htm
 - 8) National Research Council of the National Academies, FUTURE NEEDS IN DEEP SUBMERGENCE SCIENCE Occupied and Unoccupied Vehicles in Basic Ocean Research, The National Academies Press, 2004
 - 9) 門馬大和、深海への挑戦、海洋科学技術学校講演資料、(独)海洋研究開発機構、2007年3月
 - 10) スティーヴン・ジェイ・グールド、
ダ・ヴィンチの二枚貝 進化論と人文科学のはざまで、3章 面と向かって明瞭に見る、渡辺政隆訳、早川書房、2002年3月
 - 11) JAMSTECニュース、特集「しんかい6500」-1000回潜航達成-
http://www.jamstec.go.jp/j/jamstec_news/20070323/birth.html
 - 12) 山根一眞、メタルカラーの時代、「しんかい6500」のアクリル窓、小学館、1993年8月
 - 13) (社)日本深海技術協会、「世界の深海調査技術開発の現状と今後の展開に関する調査・分析」報告書、2005年2月
 - 14) Barrie Walden and Robert Brown, A Replacement for the Alvin Submersible, MTS Journal, Vol.38, No.2, Summer 2004
 - 15) Designing a Deeper-Diving Human Occupied Vehicle (HOV) Replacement : [http://www.unols.org/committees/dessc/replacement_hov.html](http://www.unols.org/committees/dessc/replacement_HOV/replacement_hov.html)
 - 16) 高川真一、海外の深海技術開発動向、(社)日本深海技術協会会報、2007年3号、2007年7月1日
 - 17) 大野檀、我が国6000m級深海潜水調査船開発の黎明期、(社)日本深海技術協会会報
 - 18) 大野檀、故岡村健二氏の残された業績のことなど、(社)日本深海技術協会会報2007年1号、2007年1月1日
 - 19) 西村屋HP、6500m潜水調査船「しんかい6500」／支援母船「よこすか」システム誕生秘話、http://homepage3.nifty.com/nishimura_ya/S6500.HTM
 - 20) (独)海洋研究開発機構のプレスリリース、2007年3月15日：
http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/PR/0703/0315_2/index.html
 - 21) サイモン・シン (青木薫訳)、ビッグバン宇宙論(上下2巻)、新潮社、2006年
 - 22) 工藤君明、船中模策 6. ニュートンの愛したリンゴの木、(社)日本深海技術協会会報、2006年2号、2006年4月1日

執筆者



客員研究官

工藤 君明

(独)海洋研究開発機構

海洋工学センター

応用技術部 調査役

<http://www.jamstec.go.jp/j/index.html>



工学博士。専門は船舶流体力学。海域利用やサンゴ礁保全、海洋生物の輸送生態などに関連する海洋科学技術の研究開発に長く携わる。海洋科学技術は面白い、研究は楽しい、計画はわくわくするものでなければならない、と信じ伝えることに努力している。