

高地環境下での飽和潜水作業について

芝山 正治¹⁾, 山見 信夫²⁾, アントニオ瑞昭世良²⁾,
中山 徹²⁾, 眞野 喜洋²⁾

1) 駒沢女子大学

2) 東京医科歯科大学医学部保健衛生学科

Saturation Diving System at High Altitude

Masaharu SHIBAYAMA¹⁾, Nobuo YAMAMI²⁾, Antonio Mizuaki SERA²⁾,
Toru NAKAYAMA²⁾ and Yoshihiro MANO²⁾1) *Komazawa Women's University*2) *Faculty of Medicine, School of Allied Health Sciences, Tokyo Medical and Dental University*

Practical saturation diving was firstly performed at high altitude in Japan in 1987. Its work was to change the screen which had covered the pipeline of a hydroelectric dam located 850 meters above sea level, the same operation had been conducted in 1992 and in 1993, 2 times each year (Total=5 operations) after the work. The saturation dives have lasted from six to eight days on 4 occasions and 13 days (Total duration=4075 minutes) on 1 occasion, since the initial pressurization until the end of the last decompression. In each operation, there had always been involved 3 divers. They have been compressed to an equivalent depth of 45~73m in the deck decompression chamber (DDC), briefed for work and transferred to the submersible decompression chamber (SDC), which was then submersed to 53~78m of depth. Wearing heated suit and breathing Heliox (both at the same temperature as the inside of the SDC), the divers have been locked out to perform their tasks, all monitored and supervised by the use of a remotely operated vehicle (ROV). The works have run uneventful and successfully until the end. The water temperature had been higher than the expected, i.e. 9~13°C in all occasions. The inside conditions of the chamber had been the following: partial pressure of nitrogen was from 0.78 ATA; partial pressure of oxygen was from 0.35 to 0.40 ATA; partial pressure of carbon dioxide was less than 0.005 ATA; the inside temperature of the SDC was from 26 to 30 °C. In conclusion, we consider saturation diving is a safe technique compared with scuba diving, which brings less risk of decompression sickness; moreover, the work is thoroughly supervised and accompanied at the surface. (Ann. Physiol. Anthropol. 13(6): 411-419, 1994)

Key words: Diving, Saturation diving system, Altitude diving

緒言

日本に於ける飽和潜水実験は東京医科歯科大学(眞野ら1970)や海上自衛隊(池田ら1990, 四ノ宮1992)及び海洋科学技術センター(村井ら1982, Nakayama

et al., 1981, 竹内と毛利1990)で今まで水深480mまでの範囲で行われてきた。特殊な作業形態としての実海域作業は、九州対馬沖の水深95m下のロシア戦艦ナヒモフ号の搭載荷具の引き上げ(田村1981)や新潟県

阿賀沖の石油掘削あるいは石油備蓄に関連する調査工事などがある。これらの飽和潜水は、実作業として行われた新潟県阿賀沖を除いて、それぞれが試験研究あるいは実験研究的な飽和潜水として行われたものであり、労務内容や作業管理について産業保健としての概念はほとんど考慮されていない。その主たる理由は現行の労働安全衛生法では特殊環境下の作業時間が制限され、かつ、ヘリウムなどの混合ガスに対する法規制が存在していないからである。飽和潜水の作業期間は、数日あるいは十数日の連続した拘束期間が課せられるため、現行法では対処できない（中央労働災害防止協会1989）。また、本稿で述べる高地における潜水は、基準となる気圧が低いため sea level の減圧表とは異なり、高地環境用の特別に配慮した減圧表を使う必要がある（Bell and Borgeardt 1976, Boni et al. 1976）。

本報告の飽和潜水作業は、標高850mの群馬県内の内陸部に存在する湖底工事として当初から当該基準監督署も注目しており、労働法規を勘案した実務作業と

して行われ、かつ、ダイバーは作業労働者として位置づけられた初めての飽和潜水作業（前原ら1988, 眞野と芝山1988）であるといっても過言ではない。

作業概要

潜水作業は、標高850mの水力発電用ダム湖底部にある取水口のスクリーン交換及び発電所制水弁交換に伴う工事であり、湖上に飽和潜水システム（図1, 2）を組み、ダイバーは船上減圧室（DDC：Deck Decompression Chamber）内で生活し、作業を行うときに水中エレベーター（SDC：Submersible Decompression Chamber）（図3）に移り湖底の作業水深まで潜降し、SDCより入室（ロックアウト）し、目的であるスクリーン（図4）の取り替え、プラグヘッド誘導作業を行った。ロックアウト時はダイバーの監視と支援台船上での状況把握及び安全性の向上のため、無人潜水機（ROV：Remotely Operated Vehicle）（図1）で水中の監視と記録を常時行った。

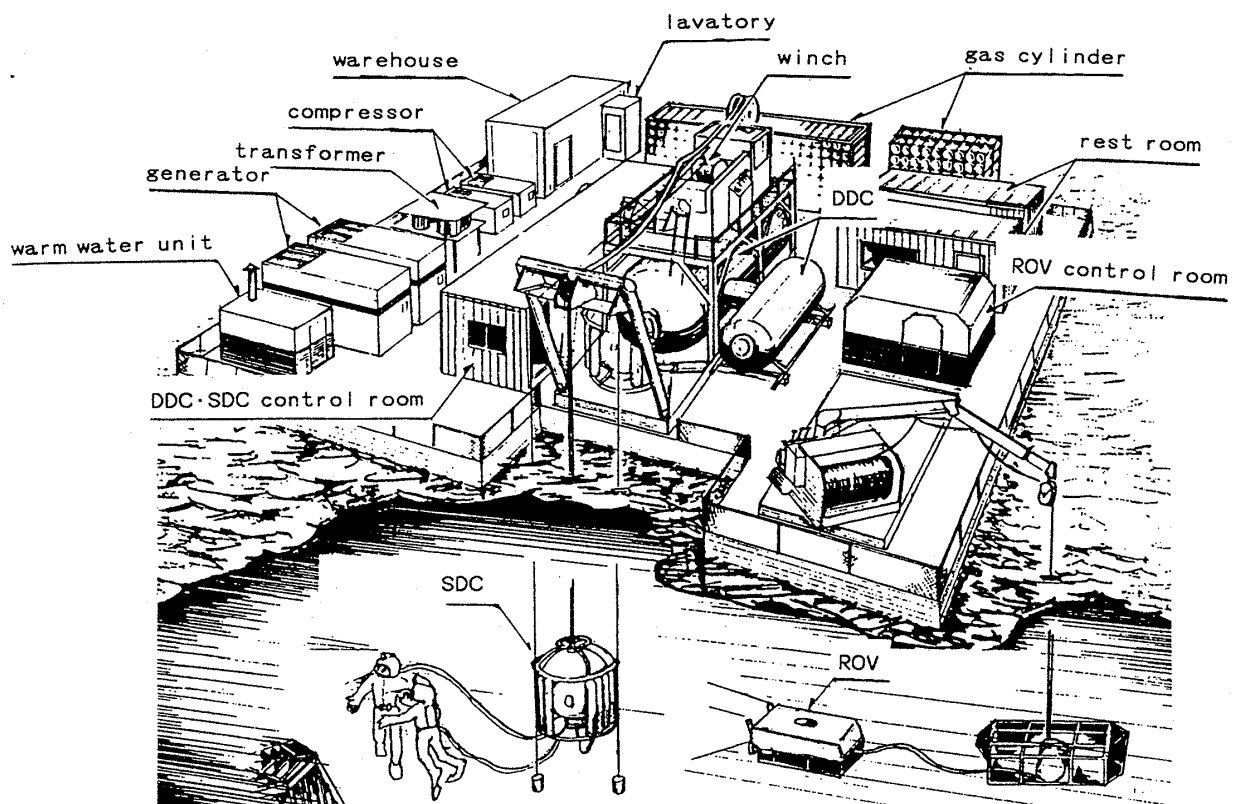


Fig. 1 External view of the facilities for saturation diving operations (Maehara et al, 1988).

DDC: deck decompression chamber.

SDC: submersible decompression chamber.

ROV: remotely operated vehicle.

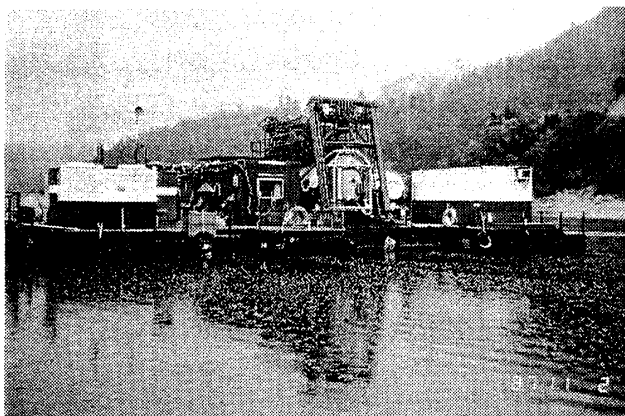


Fig. 2 The saturation diving systems.

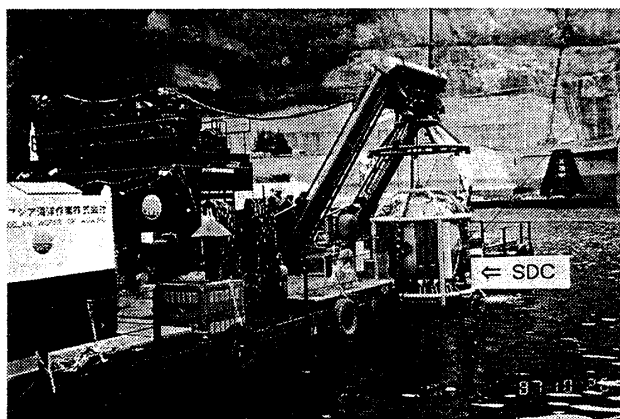


Fig. 3 Submersion of the SDC with the divers. Three divers have been transported by SDC between DDC and the bottom of the lake.

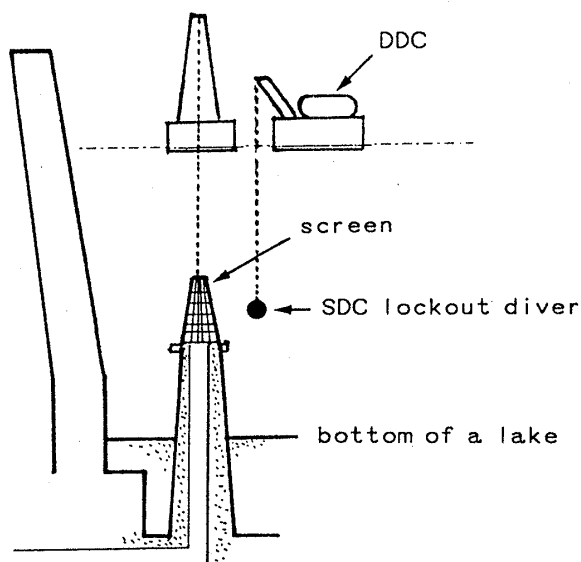


Fig. 4 Outline of the diving work. The screen to replace the old one. Divers lock out from the SDC to screen and work of biting up or taking away the screen from the base of conduit.

高地飽和潜水の実施回数と期間

作業期間は表1に示すように1987年に初めて行われ、その後、同じ方式で1993年までの計5回行われた。減圧時間を含めた飽和潜水の期間は、13日間で1回あり、残りの4回は6～8日間である。飽和潜水圧力は水深45～73mであり、ロックアウトした水深は、飽和潜水圧力プラス4～11mの50～78mである。DDCよりSDCに移り実施したロックアウトの回数は、3～12回であり、総作業時間は488～1092分であった。減圧時間は、飽和潜水圧力により異なり、54.5～74.2時間を要した。

飽和潜水のダイバーの特徴

飽和潜水を行ったダイバーは各回ともそれぞれ3名であり、潜水経験が2年以上あり、平均年齢は32.8才

Table 1 Outline of the 5 altitude saturation diving operations (850 meters above sea level).

Operation No.	Term	Duration (day) ¹⁾	Saturation depth (m) ²⁾	Number of lockout dives ³⁾	Total time of lockout (min)	Diving depth (m) ⁴⁾	Number of divers	Total time of decompression (hr)
# 1	Oct.20th～Nov.1st, 1987	13	67	12	956	78	3	66.5
# 2	Sep.16th～Sep.23rd, 1992	8	45	10	1092	53	3	54.5
# 3	Nov.23rd～Nov.28th, 1992	6	58	5	488	67	3	61.5
# 4	Sep.15th～Sep.21th, 1993	7	73	6	845	78	3	74.2
# 5	Nov.22rd～Nov.28th, 1993	7	73	3	694	77	3	74.2

- 1) The saturation diving work starts at the diver's pressurization and, at the end of their decompression the operation is considered finished.
- 2) Saturation depth is actually measured by the pressure inside the DDC.
- 3) This refers to the total of lockout incursions by the divers.
- 4) Diving depth is the maximum depth recorded during the operation.

Table 2 Divers' anthropometric measurements.

Operation No.	Name (initials)	Age. (yr)	Height (cm)	Weight (kg)
1	K.A.	32	167	72.5
	M.F.	21	175	67
	Y.S.	30	173	85
2	K.A.	37	167	72
	A.S.	41	168	68
	K.T.	25	171	72
3	K.A.	37	167	72
	A.S.	42	168	68
	H.S.	22	169	59
4	K.A.	38	167	72
	A.S.	42	168	68
	H.S.	23	169	59
5	A.S.	43	168	68
	H.S.	23	169	59
	Y.S.	36	173	86
Average		32.8	169.3	69.8
±SD		8.2	2.5	8.0

K.A. and A.S. became to the subjects as the leader 4 times of the works. H.S. became to the saturation diver 3 times. Y.S. became to the saturation diver 2 times.

であった。2名のダイバーは4回、1名のダイバーは3回、1名のダイバーは2回実施した。身体的特徴を表2に示す。

DDC内の環境コントロール

DDC内のガス組成は、ヘリウムと窒素と酸素の混合ガスとし、それぞれの分圧は、窒素0.78ATA、酸素0.35~0.40ATA、残りヘリウムとし、炭酸ガス分圧は0.005ATA以下とした。温湿度環境は、温度26~30℃、湿度50~70%の範囲内とした。ライフサポートシステムは全経過を通して飽和潜水を行う場合のすべての基準をクリアしていた(村井ら1982)。なお、湖底水温は平均11℃(9~13℃)であったので、ロックアウト中は加温潜水服を使用し、吸入用の混合ガスはDDC内のガス組成と同じとした。

加圧・減圧方法

一般の潜水における潜降(加圧)速度は、毎分10m程度が安全とされる。飽和潜水の場合は、加圧中の器機

のチェックや加圧用ガスの切り替えなどにより一般の潜水とは異なる。本飽和潜水の加圧条件は、空気環境のDDC内をヘリウムと酸素で1mを1分20秒(10mを13分20秒)の速度で目的とする飽和圧力環境まで加圧した。したがって、水深67m相当圧までに要する総加圧時間は1時間30分となった。ダイバーの加圧チェンバーは、DDCを飽和圧力に保圧した状態で3名のダイバーがSDCに入室し、飽和圧力に達した状態でDDCに移る方法を用いた。

減圧条件は高地の環境を考慮し、sea levelで使われる飽和減圧表に安全率を加えた(Bell and Borgardt 1976, Boni et al., 1976)。減圧条件は、次に示す方法を用いた。

- ①飽和圧力~60m 1.8m/h
- ②60~30m 1.5m/h
- ③30~15m 1.2m/h
- ④15~0m 0.9m/h

減圧の時は、安全率を高める目的で最終のロックアウト作業が終了した後、4時間以上の飽和環境下で保圧した後に減圧を開始した。減圧中のDDC内酸素分圧は、0.5ATAに保ち、水深15m以浅より間欠的酸素25分吸入、その後5分の環境ガス吸入を採用し、減圧症の発症予防に努めた。また、減圧が終了した後、24時間のDDC内での監視を行い、万一減圧症が発症しても直ちに再圧治療が行える体制とした。全作業が終了した後、医師による診察を受け異常の有無をチェックした後にダイバーは飽和潜水作業が終了として帰還させた。

各飽和潜水のプロフィール

各回の飽和潜水プロフィールを図5~9に示す。

第1回目の飽和潜水(図5)は、1987年10月20日から11月1日まで行われ、加圧開始より減圧終了までの期間が13日間であった。実作業日数は9日間、加圧と作業準備で1日、減圧に要した時間が66.5時間であった。ロックアウトして実作業を行う水深は78mであったので、飽和圧力は水深67mとした。ロックアウト時間は62~98分間であり、期間中12回実施され、合計時間が956分となった。この間、3基のスクリーンの交換作業が行われた。

第2回目の飽和潜水(図6)は、1992年9月16~23日までの8日間行われた。飽和圧力はダム水位の低下

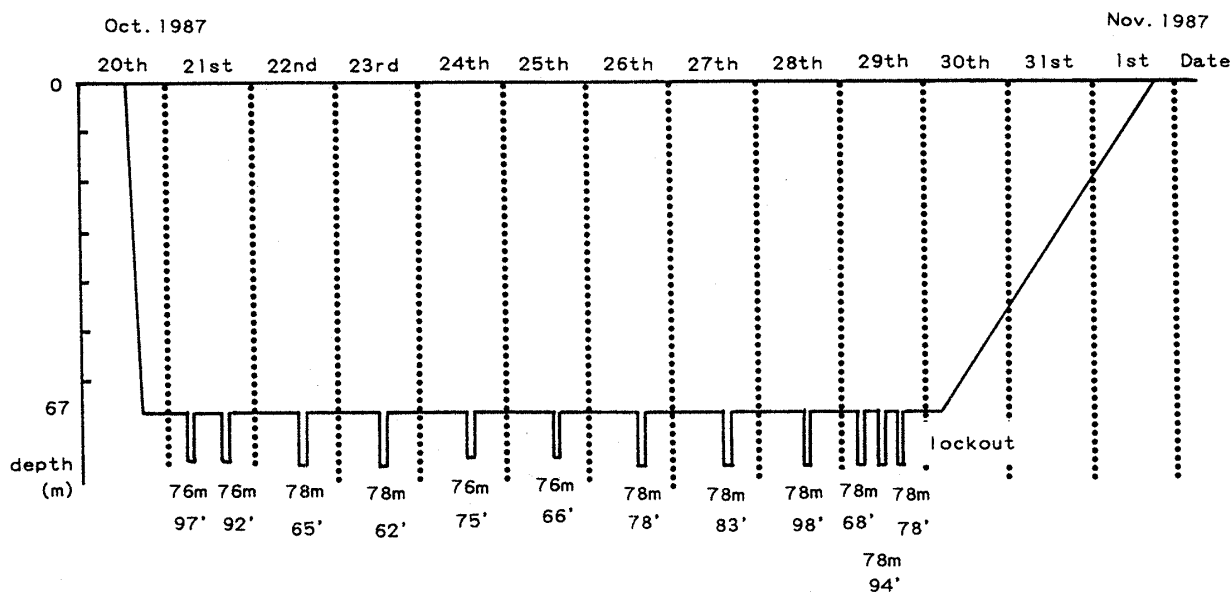


Fig. 5 Profile of the first saturation diving operation. (From Oct. 20th to Nov. 1st, 1987) The saturation dive consists of 13 days, 11 ten days saturation at 67m depth, 2 days decompression. 12 excursion dive works were done during saturation.

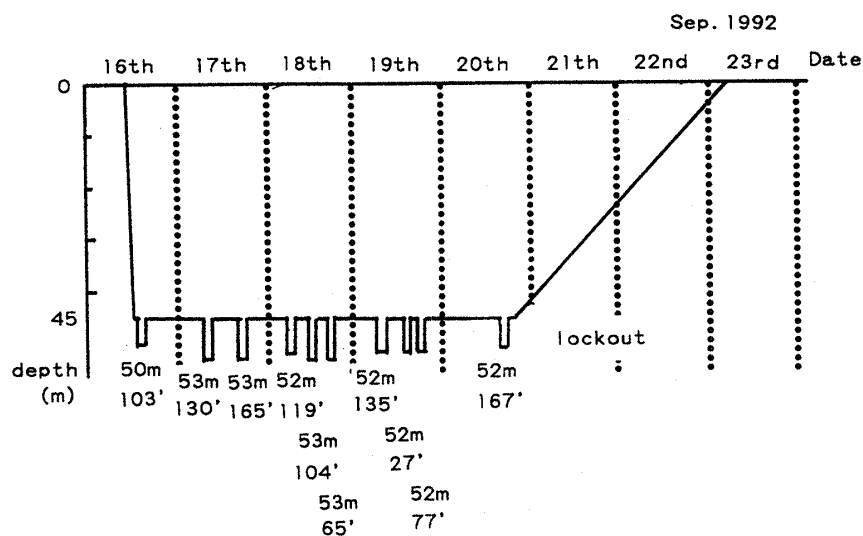


Fig. 6 Profile of the second saturation diving operation. (From Sep. 16th to Sep. 23rd, 1992) Saturation dive work was 5 days saturation at 45m depth and 10 excursion dive works were done to 52 and 53m depth.

で45mとなった。

第3回目の飽和潜水(図7)は、1992年11月23~28日までの6日間行われた。

第4回目の飽和潜水(図8)は、1993年9月15~21日までの7日間行われた。

第5回目の飽和潜水(図9)は、1993年11月22~28日までの7日間行われた。

ロックアウト時の潜水プロフィールをダイビング・データ・レコーダで記録された1例を図10に示す。こ

れは第4回目実施された9月17日の2回目のロックアウトの時のデータである。ロックアウトはSDCに移ったときから、DDCに帰還するまでの時間としている。DDCよりSDCに移り、ロックアウト水深まで加圧した後、SDCは目的水深まで潜降し、ダイバーはSDCからロックアウトする。潜水水深は、スクリーンが高さ9mあり(図4)、その台座への取り付け作業も含め、清水深度63mから78mまでの15mの高低差を必要としたが、飽和潜水によるエクスカージョンのため

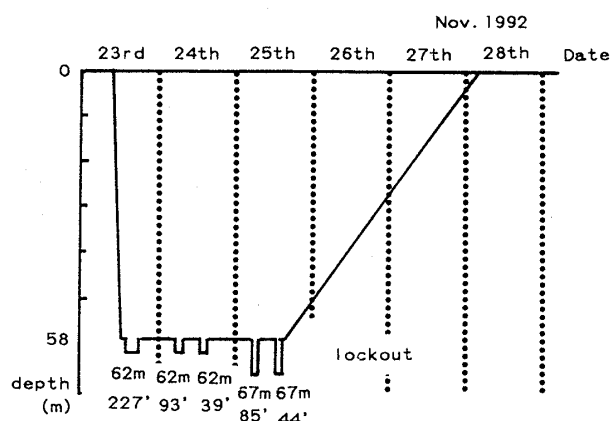


Fig. 7 Profile of the third saturation diving operation. (From Nov. 23rd to Nov. 28th, 1992) The saturation dive works were done at 58m depth, 5 excursion from 62 to 67m depth and needed two and half days decompression.

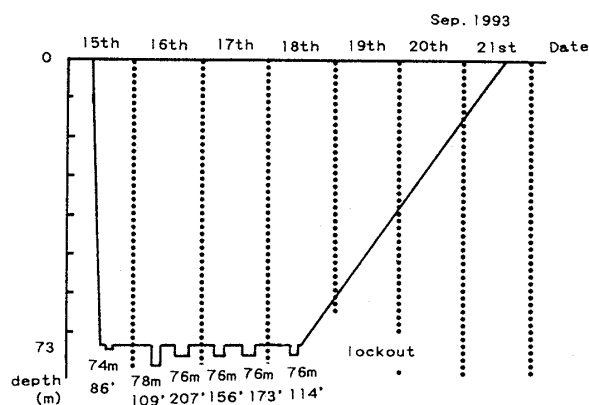


Fig. 8 Profile of the fourth saturation diving operation (From Sep. 15th to Sep. 21st, 1993) The saturation dive needed 4 days and 73m depth with 6 excursion to 78m.

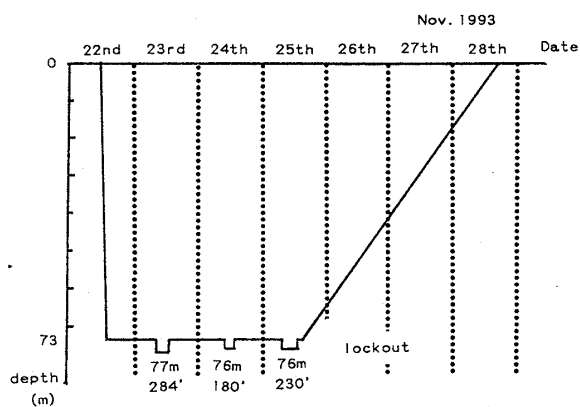


Fig. 9 Profile of the fifth saturation diving operation. (From Nov. 22nd to Nov. 28th, 1993) The saturation dive were done at 73m depth with 3 excursion from 76 to 77m depth and followed 3 days for decompression.

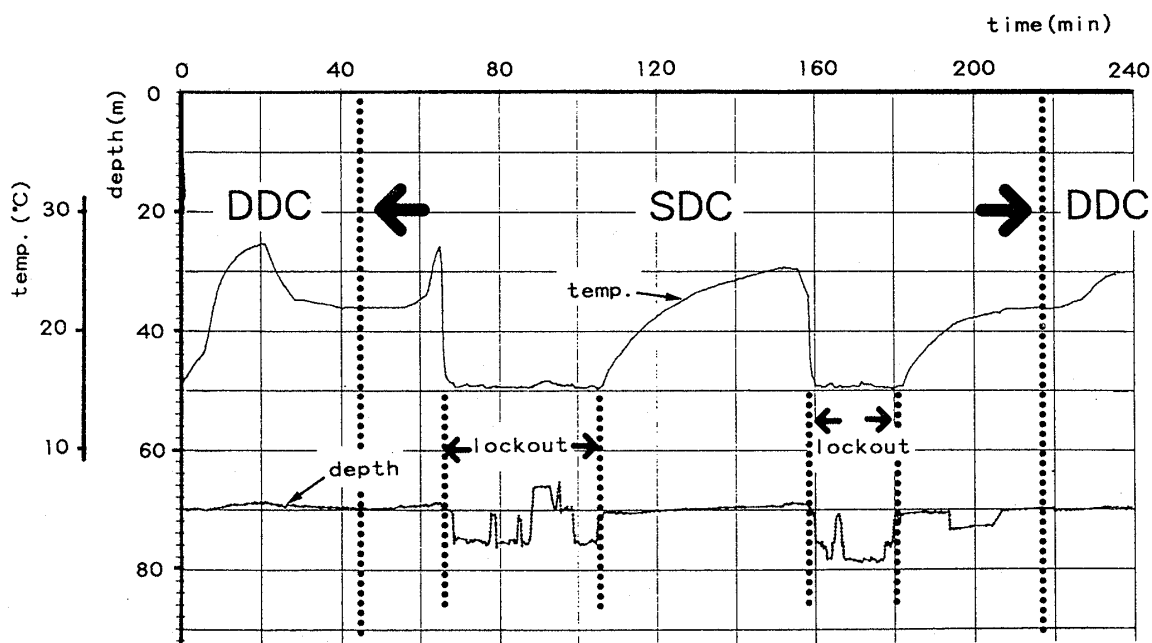


Fig. 10 Diving depth and water temperature recorded by a diving data recorder. The diving depth and water temperature were measured (# 4 saturation dive on sept. 17th, 1993).

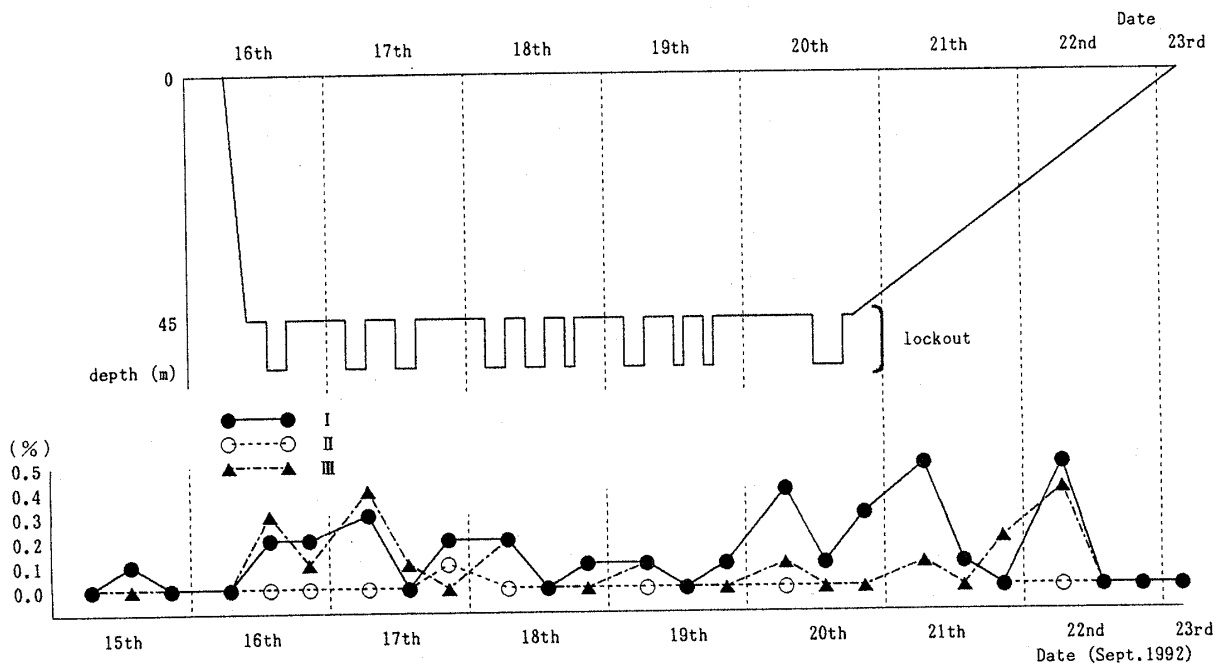


Fig. 11 Symptoms recognized during their diving work (#2 saturation dive on sept. 1992). Each diver were tested their subjectiv symptoms 3 times per day during their saturation included decompression. This is the data from the second saturation work.

- I : sleepiness amd languor.
 II : difficulty of concentration.
 III : sense of incompatibility.

減圧症予防対策としての減圧時間を要す必要はまったくなく、また湖水であるために潮流もなくダイバーの一連の作業はROVで監視されており、ダイバーの行動を湖上の支援台船で十分に管理でき、安全な作業を保証できた。

ライフサポート（生命維持）システム

ライフサポートとして酸素、二酸化炭素、温湿度の管理、支援台船とDDCおよびSDCとの通信などあらゆる内容と要求され得る問題点のすべては克服されており、支障なく飽和潜水を完了することができた。大気圧へ復帰し、その後24時間の事後観察をDDC内で、さらに24時間の観察を宿舎で行い、医師により診察を受け異常のないことを確認した上で飽和潜水作業は完了された。なお、作業期間中は常勤の産業保健婦と24時間連続待機する産業医が安全及び衛生管理にあたった。第2回目の作業時だけであるが、作業ダイバーの疲労度の経過を知る目的で日本産業衛生学会編の自覚症状調べを作業期間前後も含めて1日2～3回測定し、心理的、肉体的疲労の蓄積がないことを確認した(図11)。

緊急対策

緊急対策としては、支援台船上にDDCと同規模のチェンバーを1基用意し、緊急時にダイバーを移し、医師や救急処置の教育を受けた者がチェンバーへ入室できる体制を組んだ。5回行われたすべての飽和潜水作業において緊急事態の発生はなく、結果として緊急用チェンバーは使用されなかった。

考 察

短時間潜水の方法で今回の潜水作業内容を行うとするならば、その条件を衛生法規にてらすと水深70m下で60分の作業を繰り返す潜水となる。この条件をU.S. Navy Diving manual (Department of the Navy 1987)の減圧表を用いて潜水作業を行うと各減圧時間に350分を要し、実作業時間を含めると1回の潜水で約7時間となる。また、1ダイバーは1日にこの60分の作業を1回しかすることができない。このことは作業効率が悪いだけでなく、60分以上の長時間連続潜水作業はさらに長時間の減圧を要し、実務的作業を完了させることは不可能に近い。さらに毎回の潜水作業毎に減圧症罹患の危険を伴う。飽和潜水は、従来の非飽和潜水

の問題点を解決するメリットがある反面、デメリットとして潜水システムが大規模となり、高価な機器を使うため費用が高くなる(村井ら1982)。また、ライフサポートシステムの精密さが要求され、特に環境ガス組成のコントロール、ヘリウム故に要求される厳格な温度制御やコミュニケーションの問題、酸素や二酸化炭素その他のガスの分圧の経時的チェックが重要である。これらの問題点については、今回行われたすべての飽和潜水で満足する結果が得られ、一般的に飽和潜水を行う場合の基準(村井ら1982)をすべてクリアされ、支障なく実施できた。

飽和潜水で重要な減圧方法は、本作業が高地清水という条件を勘案し、慎重な補正を行い、海拔0mの海上で行う場合の飽和潜水と比較して合計減圧時間を延長させて安全率を高める必要がある(Bell and Borgwardt 1976, Boni 1976, 矢野1981)。まず、減圧時はダイバーに肉体的作業を与えないで、DDC内で安静状態を保つようにさせた。減圧速度は深度毎に異なる方法で減圧し、15m以浅からは酸素吸入を行い、減圧症の発症予防に努めた。

飽和潜水中の病気や災害発生の対策は、DDCと同規模のチェンバーをドッキングして用意し、何時でも医師や救急処置の教育を受けた者が飽和居住区(DDC)へ入室できるようにし、その後の作業には支障を与えない体制とした。また、その時の加圧時間に約1~1.5時間を要するため、その間の緊急処置対策としてダイバーは事前に米国のEMT(Emergency Medical Technician)に準じた救急処置の講習を修得させてあるとともに簡単な救急キットをDDC内に用意した。

疲労度調査は1日2~3回行われた。第I成分の「ねむい・だるい」の症状は午前と作業後半に現れた。これは1週間の連続作業による疲労感が増したものと考えられ、とくに本飽和潜水で特有に認められる現象ではない。第II成分である「注意集中の困難」については全経過を通して顕著な増加は認められなかった。第III成分の「身体違和感」は第I成分とほぼ同じような動きを認めた。この成分は飽和潜水1日目と2日目及び減圧終了直後にそれぞれ訴えが高く、局所的な身体違和感が認められた。これらの調査から飽和潜水作業環境は陸上作業と比較しても、とくに疲労が蓄積しやすい環境ではないと認められた。

飽和潜水はシステム、人員、教育、装置及び経費な

どが高度に要求されるが、減圧症などの高気圧障害の予防対策や潜水作業中の安全対策及び格段の潜水作業効率が高まる利点がある。5回の高地での飽和潜水作業の実施を通して将来、わが国において水深50mを超えるような深い潜水作業が要求される場合には、安全性が高く作業効率の優れたこの飽和潜水システム作業は有用な潜水作業形態として捉えられることが立証できた。

謝 辞

最後に本研究実施に当たり東京電力株式会社、川崎重工業株式会社、アジア海洋作業株式会社の協力の下に行うことができ、深甚なる謝意を表します。また、行政上の指導を沼田労働基準監督署より得て実施したことも付け加える。

文 献

- Bell L. and R.E. Borgwardt 1976: The theory of high-altitude corrections to the U.S. Navy standard decompression tables. The Cross corrections. Undersea Biomedical Research, 3(1): 1-23.
- Boni M., R. Schibli, P. Nussberger and A.A. Buhlmann: Diving at diminished atmospheric pressure: air decompression tables for different altitudes. Undersea Biomedical Research, 3(3): 189-204.
- 中央労働災害防止協会, 1989: 新版潜水士テキスト, 労働省安全衛生部労働衛生課, 243-303.
- Department of the Navy, 1987: U.S. Navy Diving manual. Department of the Navy, Washington, 7-1-7-24.
- 池田知純, 鈴木信哉, 岡本安裕, 水上浩明, 小比木国明, 山田邦雄, 濱田清, 小沢浩二, 橋本昭夫, 仁田原慶一, 鈴木弘, 中林和彦, 伊藤敦之, ラムゼイ R. ピアソン, 1990: 本邦最初の320m 飽和潜水(エクスカーション 深度350m) の一例. 防衛衛生, 37: 251-262.
- 前原康幸, 橋詰真, 田村孝史, 1988: 飽和潜水を採用した取水塔スクリーン取替工事の概要. 電力土木, 216: 1-10.
- 眞野喜洋, 梨本一郎, 重藤脩, 富安和徳, 上田博, 1970: 海中居住の実験的研究—水深40m 相当模擬海中居

- 住時の生体機能について。日高压医誌, 5:4-6.
- 眞野喜洋, 芝山正治, 1988: わが国で初めて行われた飽和潜水作業の安全性について。第61回日本産業衛生学会総会, 304.
- 村井徹, 金田英彦, 清水孝悦, 神田修治, 藤森紘明, 井上和夫, 長櫓新市, 1982: 海洋科学技術センターのSDC・DDCシステムにおける環境コントロールについて。日高压医誌, 17(1):29-32.
- Nakayama H., S.K. Hong and M. Matsuda, 1981: Energy and body fluid balance during a 14-day dry saturation dive at 31 ATA. In: Bachrach A.J., Matzen M., eds. Underwater physiology VIII. Bethesda: Undersea Medical Society, 541-54.
- 四ノ宮成祥, 1992: 飽和潜水における外耳炎発症メカニズムとその対策について。日高压医誌, 27(2):67-85.
- 竹内久美, 毛利元彦, 1990: 飽和潜水実験時血清トランスアミナーゼ活性値の変化。日高压医誌, 25(3):143-151.
- 田村裕昭, 林皓, 林克二, 山口柳二, 渡辺誠二, 陣山貴美子, 川寫真人, 大岩弘典, 1981: ナヒモフ号調査潜水士の耳感染症について。日高压医誌, 16(4):199-201.
- 矢野尚, 1981: 安全な高所潜水減圧。日高压医誌, 16(2):138-141.

(1994年2月21日受付)

(1994年10月20日受理)

芝山正治 〒206 東京都稲城市坂浜238 駒沢女子大学
Masaharu SHIBAYAMA Komazawa Women's University, 238 Sakahama, Inagi-shi, Tokyo 206, Japan