

●原 著

潜水医学実験隊の新しい深海潜水シミュレーター

小此木国明* 小沢浩二* 中林和彦*
橋本昭夫* 甲斐有司* 大野文夫*
妹尾正夫* 鈴木卓* 大岩弘典*

60年3月に完成した潜水医学実験隊の深海潜水シミュレーターは飽和潜水員の適性・教育訓練、潜水にかかわる生理学・心理学的研究、及び潜水装備品の人間工学的研究を目的に設計建造された。

シミュレーターは、高圧チャンパー群、管制室、ライフサポート群、高圧ガス供給装置群、及び生体環境情報処理装置(EBIPS)から構成されている。高圧チャンパー群は移乗室(CL)で連絡された船上減圧室(DDC)2基、DDCから分離した水中昇降室(PTC)と潜水槽(WP)から成る。PTCはエクスカッション潜水を行う3名の潜水員をCLからWPに移動させる。EBIPSはバイタルサイン系、体熱損失系、高圧神経症候群系の3つの測定システムと集中データ処理装置から成り、生体・環境データをオンライン処理及びオフライン処理可能とした。

EBIPSは60年10月の100m飽和潜水実験で初めて全体が稼動し、一部のソフトの改善を残しているが、ほぼ満足し得る性能を発揮した。

キーワード：深海潜水シミュレーター、監視装置、生理学的モニタリング、飽和潜水

A deep diving simulator at MSDF Undersea Medical Center

Kuniaki Okonogi, Koji Ozawa, Kazuhiko Nakabayashi, Akio Hashimoto, Yuji Kai, Fumio Ohno, Masao Seno, Taku Suzuki and Hiromichi Ohiwa

MSDF Undersea Medical Center, Yokosuka, Japan

A Deep Diving Simulator (DDS) was completed in June, 1985, at MSDF Undersea Medical Center in Yokosuka. Main purposes of DDS are to educate and train deepsea divers and personnel for saturation diving operation, to conduct research related underwater physiology and psychology, and to study human factor engineering of diving equipments. The DDS comprises a hyperbaric chamber complex, main control room, life support and environmental control system, high pressure gas storage area and supply system, and Environmental-Biological Information Processing System (EBIPS). The hyperbaric chamber complex con-

sists of two deck decompression chambers (DDC), center lock (CL) that connects two DDCs, personnel transfer capsule (PTC), and wet pot (WP) that is separated from DDCs. The PTC transfers three divers from the CL to the WP for excursion diving. The EBIPS is composed of vital sign, body heat loss and high pressure nervous syndrome (HPNS) section, and provides on-line analysis of ongoing measurement data as well as data logging for future study. The EBIPS was run for the first time during a 100 meters simulated saturation diving in October, 1985. Although the system has not been completed in computer programming, its function seemed to be satisfactory.

(author's abstract)

Keywords:

Deep diving simulator
Monitoring system
Physiological monitoring
Saturation diving

*海上自衛隊潜水医学実験隊

表1 深海潜水シミュレーター主要目

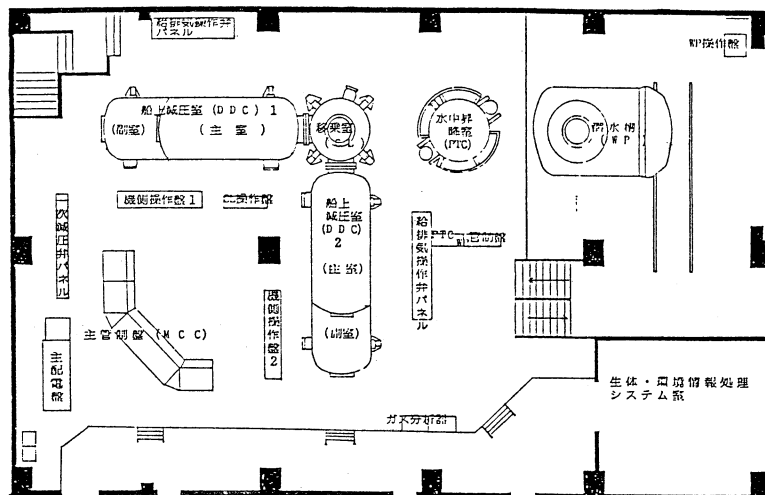
- 1. 最大潜水深度 700m
- 2. 潜水員収容数 $6^{A}_{DDC} : 1 \text{ 名} / 3^{A}_{PTC} \cdot 2^{A}_{WP}$
- 3. 主要装備品
 - (1) 耐圧殻
 - (6) 1次減圧弁パネル・機側制御盤
 - (7) PTCハンドリング装置
 - (8) WP温度制御装置
 - (9) FPC(フィンガーピンクロージャ)
 - (10) ME機器
 - (11) ガスバンク(84カードル) 17.600m³
 - (12) ガス昇圧回収装置

	DDC (2基)	CL	PTC	WP	
型式	円筒型(球型 主室副室)	円筒型	球型単室	円筒型	
寸法	内径 (m)	2.1	2.1	2.2	3.0
長さ (m)	7.1	2.45	2.2	5.0	
容積(m ³)	22.9	7.0	5.6	32.0	

- (2) 外部循環装置 2式
- (3) 内部循環装置 1式
- (4) 消化、給水、サニタリー装置 各 2式
- (5) MCC、LSC、WPCC 各 1式

4. 関連施設

- (1) シミュレータ棟(シミュレータ室・第1-3補機室) RC-2 938m²
- (2) オペレーション棟(講堂、待機室、オペレーション室、配膳室、クリーンルーム、潜水器整備室、医務室、器材ショップ、工作室、浴室、便所) RC-3 600m²
- (3) ガス源室、84カードル収納可能 RC-1 400m²
- (4) 受電室 RC-1 73m²
- (5) 機械室 RC-1 170m²



深海潜水シミュレーター配置略図

図1 深海潜水シミュレーター配置図

はじめに

有人潜水の新しい進歩の過程で生じた sealab III の潜水員の死亡は深海潜水技術の発展に停滞をもたらした。この事故は潜水員に対するライフサポートに対し、特に潜水生理学の基礎研究に関して、陸上シミュレーターで十分な評価を得ずして、実海面に臨んだことに起因する。

フランスの海軍適応医学研究所 (C.E.R.B.) の B. Broussolle は実海面で安全な潜水を実施するには、陸上シミュレーターによる潜水員個人の技術(運用)、生理、心理、及び装備に対する限界を認識させ、チームの練度に関する評価を得て進め

るべきであると言っている。

60年3月、潜水艦救難母艦「ちよだ」の就役にともない、深海潜水装置(DDS)、並びに深海潜水艦救難艇(DSRV)の運用支援のために、潜水医学実験隊に設置した深海潜水シミュレーターは、深海潜水や飽和潜水にかかわる潜水員の生理、心理、及び人間工学に関する情報と環境データとを組み合わせ、リアルタイムで迅速に解析評価し、潜水員個人の環境適応能、チーム編成と個人装備品の適応評価を進められるように設計したものである。

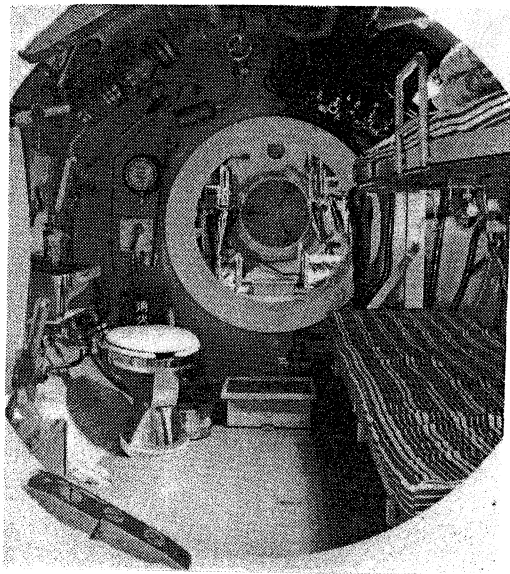


図2 船上減圧室 (DDC) 内部

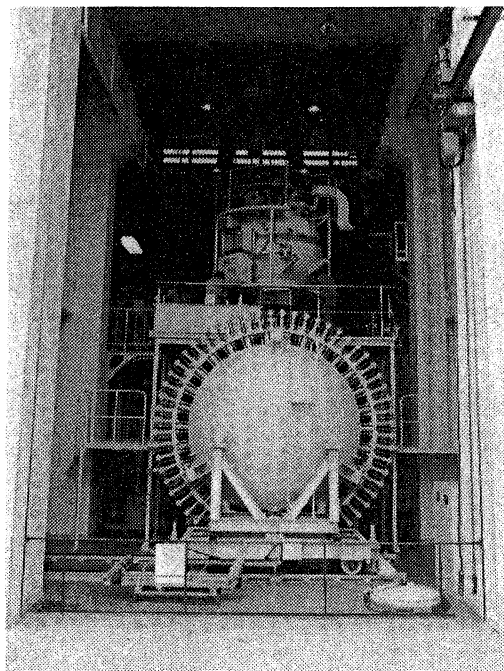


図4 潜水槽 (WP)

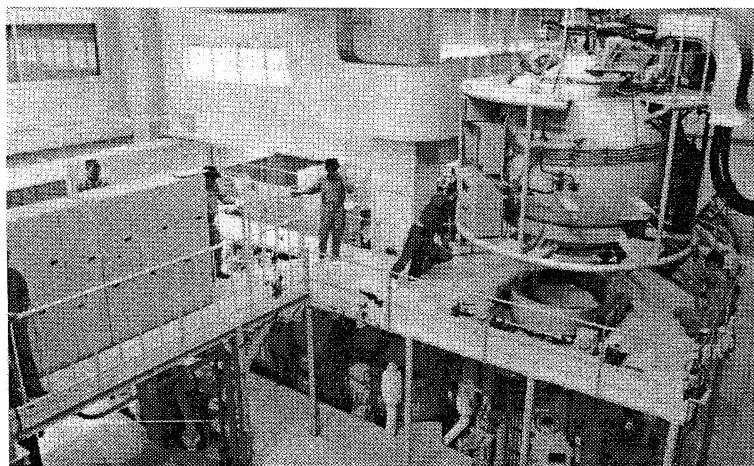


図3 水中昇降室 (PTC)

シミュレーターの設計

構成は1.高圧チャンパー群, 2.ライフサポート群と高圧ガス供給装置群, 及び3.生体環境情報処理装置 (Environmental-Biological Information Processing System: EBIPS)から成る。表1に主要目を示す。

1. 高圧チャンパー群

(1)最高使用深度700m, 飽和潜水は450m とする。

(2)高圧チャンパー群の組合せは船上減圧室 (DDC) 2基, 移乗室 (CL), 水中昇降室 (PTC), 及び潜水槽 (WP) から成り, 潜水員が実海面での潜水を再現できるように WP と CL を切り離し, PTC で移動するようにした (図1, 2, 3, 4)。DDC は主室と副室とから成り, 両者は両面耐圧ハッチで完全に分離可能で, 副室は救急治療室として使用できる。WP は横円筒型で, 5℃までの低温環境を再現でき, その横扉開閉機構はフィンガ

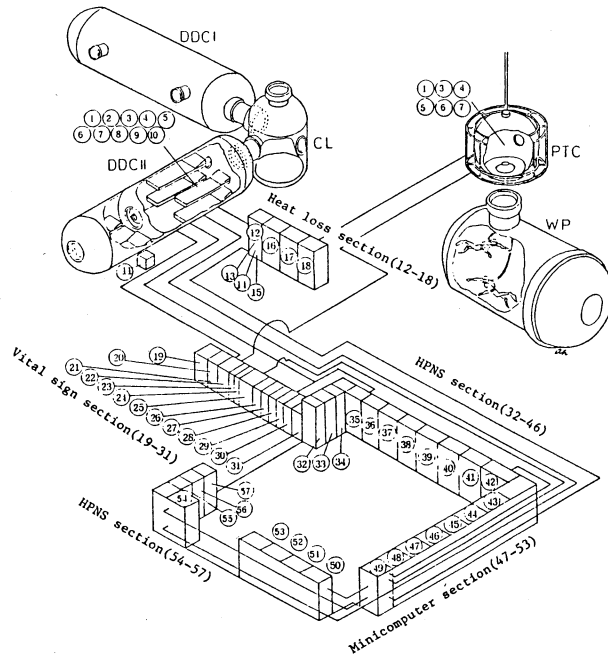


図5 EBIPS 系統図

ービン方式とした。

2. ライフサポート群及び高圧ガス供給装置群

(1)制御システムは手動系と自動系の2系統とした。

(2)高圧酸素に対する防災上からステンレス及び銅配管とした。最も重要な問題として、機器及び潜水員の防災を考慮して高圧ガス配管系及びライフサポート配管系には5~20 μ のフィルターを装備しチャンパー配管系の清浄度を高め、高圧ガス関連機器の故障及び潜水員の健康、特に感染予防を考慮した。チャンパー内の清浄度は10万/ft³で設計した。

3. EBIPS

研究の迅速な評価解析のため生体及びシミュレーター環境からの情報を処理するEBIPSを設け、高圧ヘリウム酸素環境への順化適応の研究を容易にするとともに潜水員の安全性を確保する。

EBIPS の設計

EBIPSは潜水員の生命維持管理、環境適応状況の把握、生理学、心理学的研究、装備品の人間工学的研究を目的に特別に整備した。このシステム的设计にあたり、次の事項に留意した。

(1)信頼性と安全性の高いシステムであること。特に高圧ヘリウム酸素環境であることから、測定時間に制限があり繰り返し測定が困難なことから、装置の信頼性が要求されるとともに、閉鎖環境下で使用するため、装置の電気的安全性が要求され、使用材料の吟味が必要である。当装置のチャンパー内配線はすべて難燃性のテフロン線を使用した。

(2)生命維持管理に直結する情報がリアルタイムで把握できること。

(3)目的に応じた生体環境情報が任意に選択でき、表示記録が可能であること。

(4)各種生体環境情報を集中管理でき、かつ総合的な解析処理が可能であること。

(5)訓練・研究の発展的変化に対応できるように拡張性があること及び関連機器を豊富に有すること。

以上の考え方と現在の飽和潜水の運用における医学的問題点を考慮して、本システムを1.バイタルサイン系、2.体熱損失(Heat Loss)系、3.高圧神経症候群(HPNS)系の3系統にわけ、これらを集中データ処理装置(日本データゼネラル Desktop Generation Model 30)で管理することにし

バイタルサイン系の構成

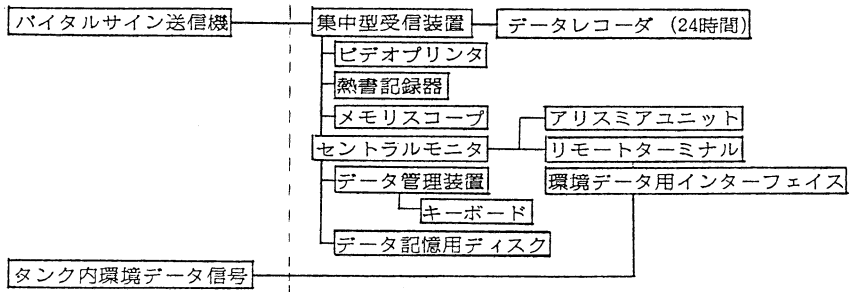


図6 バイタルサイン系構成図

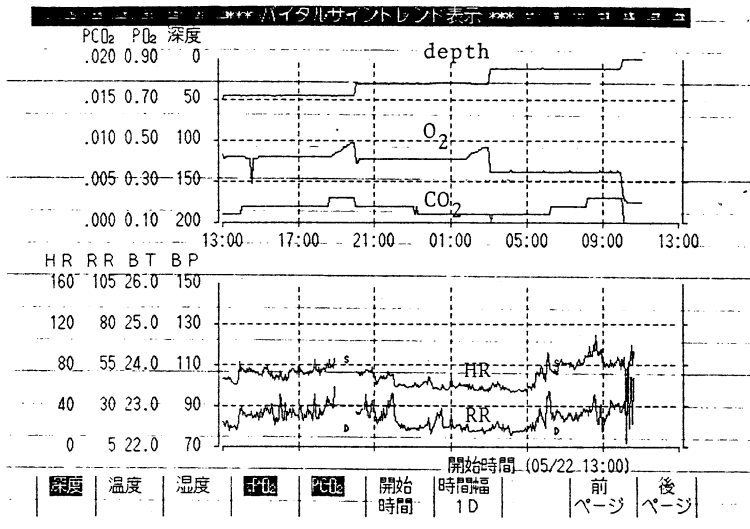


図7 バイタルサイン系トレンド表示例
(50feet からの減圧時)

た。図5が各チャンパーからの系統を示す全体像である。

1. バイタルサイン系

図6にバイタルサイン系の構成図を示す。

生命維持管理に直結する情報をリアルタイムで表示し、潜水員の安全性を確認するモニタリングシステムについては、その必要性及び測定技術について多数報告がある。^{1)~3)}

我々は潜水員のバイタルサインを24時間モニターし、環境データとの相関を処理し、医師が深海潜水運用の安全性を常に判断可能なものにするため、テレメータシステム(日本光電DMP-7100)

を採用し、Dry環境では潜水員に送信機を携帯させ、チャンパー内にアンテナを設け、同軸電線貫通部を通して信号を送るようにした。Wet環境(PTC-WP)では潜水員から有線でPTC外部に信号を取り出し、PTCが移動するため、その機側に送信機をつけ、モニター区画で受信する。現在、連続モニター可能な項目は体温・心拍数・呼吸数であり、心電図の記録も可能なことから不整脈に関するデータ処理ソフトも付加している。

生体と環境の情報はリモートターミナル(沖電気if-800)で処理し、データの数表とトレンドグラフが表示されるようにソフト開発した。図7がト

体熱損失系の構成

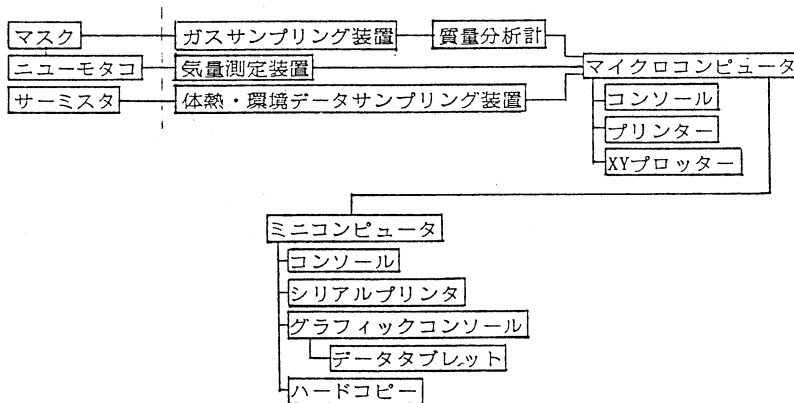


図8 体熱損失系構成図

レンドグラフである。

2. 体熱損失系

高圧ヘリウム酸素環境下ではヘリウムの熱伝導性に基づく体熱損失の増加が問題となる^{4),7)}。特に実海面での深々度潜水では呼吸ガスとしてヘリウム酸素混合ガスを使用することにあわせ、低水温であることから、呼吸性熱損失及び皮膚からの熱損失が大きく、Hypothermiaの危険が常につきまとう。現在呼吸ガスの加温、加温潜水服の着用によりこの危険を防止している。しかし深々度潜水における体熱損失に関しては多くの問題が残されており、飽和潜水における一つの課題とされている。

そこで体熱損失に関する研究のために測定システムを組み立てた。図8がその構成図である。このシステムにおいても迅速なデータ処理を可能とするものとした。質量分析計(ウエストロン WSTR-1700X)とニューモタコ気量測定装置(ウエストロン WFMU-600D)の組合せで、マイコン処理(日本データゼネラル N-10-CPU)により、Breath by Breathの呼吸代謝測定を可能とし、同時に体温・皮膚温・環境データを加え、熱損失諸量を算出しようとするものである。

まずこのシステムの開発にあたり、Breath by Breathの測定をめざすことから、高圧チャンパー内からのサンプリング方法の検討を行い、系路の長さによる遅れ、及び立ち上りの遅れは実測値から時間補正、及びサンプリングチューブの径の調

整をすることにより解決した。

高圧ヘリウム酸素環境下の呼吸ガス中の酸素及び炭酸ガス濃度は圧力にもなって低い値となり、分析計はS/N比の高いものが要求される。この質量分析計は、信号処理によりHe、H₂Oを除いた組成ガスの分析を可能とし、S/N比を高くした。また、He、N₂、Ar、O₂、CO₂、C₂H₂、H₂Oの7種の分析が可能である。

ニューモタコ気量測定装置も高圧下で測定するため径を大きくし、測定手順に校正操作を組み込み精度を確保した。表2が体熱損失系の諸量の算出結果である。

またWet環境下の潜水中の体熱損失測定を可能とするためには、換気量の測定が水中で出来なければならない⁸⁾。種々の測定法を検討したが、適切な方法を見出すことができなかった。現在インダクティブ・プレストモグラフ(レスピトレス)の適用を検討中である。

このシステムはまた各種の呼吸循環系に関する測定(Multiple Breath N₂ Washout法による肺換気分布、C₂H₂ Rebreathing法による肺血流量など)にも使用できる。

3. HPNS系

ヘリウム酸素潜水で深度180~200mを越えると高圧神経症候群(High Pressure Nervous Syndrome: HPNS)の発症がみられるといわれ⁹⁾、この症状は、振戦、注意力低下、あくび、眠気、めまい、はきけをとめない、脳波測定ではθ波の出

表2 体熱損失系の測定例 (105m dry 環境)

TIME [M:S.ms]	HR [B/M]	TRESP [C]	VE [L/M]	VA [L/M]	VO [L/M]	VA/VE [%]	VO2 [L/M]	VO2/VE [%]	ME [KCAL/M]	ERE5F [CAL/M]	ERE5F/ME [%]	RFL [CAL/M]	RFL/ME [%]
25: 0:7	55	33.14	15.82	10.75	5.97	63.48	315	2.92	2.12	130.3	7.15	145	7.58
26: 8:9	55	32.11	15.95	10.82	4.47	71.28	272	1.32	2.18	112.4	3.18	127	5.88
27: 0:5	51	33.19	12.49	9.38	3.10	75.38	305	1.47	2.92	126.5	6.28	139	6.92
28: 2:6	54	33.94	13.49	10.22	3.27	75.63	332	2.43	2.30	137.4	5.99	150	5.59
29: 2:4	53	32.54	13.93	10.92	3.91	72.57	337	2.44	2.13	139.5	6.57	153	7.21
30: 3:3	51	32.79	11.52	8.38	3.58	71.38	279	1.55	1.65	111.6	6.57	122	7.36
31: 7:2	51	32.94	13.08	9.62	3.45	74.75	274	2.21	2.15	113.3	5.42	128	6.01
32: 7:3	50	32.75	11.09	8.14	2.94	74.14	241	2.11	1.62	109.0	6.28	110	5.30
33: 9:1	63	32.93	15.08	11.71	4.38	73.24	326	2.19	2.86	138.9	4.85	154	5.39
34: 2:7	53	32.75	14.83	10.91	3.38	73.24	313	1.11	2.59	123.6	5.14	143	5.80
35: 1:3	59	32.77	13.62	9.87	3.78	72.57	254	1.17	2.08	121.5	5.86	134	6.47
36: 1:9	50	32.71	14.08	10.08	4.00	71.31	340	2.42	2.91	140.6	7.99	153	7.84
37: 8:6	51	32.76	14.70	10.59	4.11	72.97	343	2.26	2.95	141.8	6.38	153	7.82
38: 2:1	52	32.68	10.19	7.83	2.38	81.17	241	3.51	4.48	95.7	7.83	103	8.30
39: 2:2	52	32.62	30.77	24.11	6.66	79.91	283	2.16	4.78	117.1	6.20	132	6.31
40: 1:6	59	32.32	14.53	10.40	4.18	71.62	323	2.22	2.21	133.7	6.96	142	6.63
41: 0:3	52	32.56	30.37	24.98	5.82	71.28	279	2.12	4.68	116.2	6.45	135	7.10
42: 4:0	49	32.53	13.80	9.35	4.25	83.96	275	2.13	1.79	122.2	6.95	139	7.81
43: 0:6	53	32.91	10.13	7.70	2.45	76.78	248	2.48	1.61	102.5	6.78	112	7.40

TIME [M:S.ms]	HR [B/M]	RR [C/M]	TRESP [C]	R [C]	VO2 [L/M]	VE [L/M]	VO2/W [%]	VO2/VE [%]	VO2 [L/M]	ME [KCAL/M]	ME/ESA [CAL/M]	RFR
25: 0:7	55	14.3	33.1	.97	493	15.82	2.92	3.01	377	2.12	1.16	71
26: 8:9	55	13.8	33.1	.93	414	15.05	6.17	3.28	268	2.18	1.20	75
27: 0:5	51	13.8	33.2	.87	430	12.49	5.97	3.39	245	2.02	1.11	62
28: 2:6	54	11.9	33.0	.82	458	13.49	6.38	4.17	281	2.30	1.26	87
29: 2:4	53	13.7	33.3	.82	433	13.93	6.45	3.81	254	2.13	1.17	72
30: 3:3	51	13.6	32.9	.82	339	11.52	4.52	3.41	292	1.69	1.10	32
31: 7:2	51	10.3	32.9	.82	437	13.08	6.51	4.12	358	2.15	1.18	74
32: 7:3	50	11.7	32.8	.94	309	11.09	4.82	3.40	287	1.62	1.09	25
33: 9:1	63	9.0	32.9	.80	589	16.08	8.78	4.45	469	2.86	1.57	138
34: 2:7	53	10.8	32.8	.81	512	14.88	7.64	4.14	413	2.50	1.38	106
35: 1:3	59	11.2	32.8	.85	416	13.63	6.21	3.72	351	2.08	1.14	68
36: 1:9	50	10.3	32.7	.83	465	14.08	6.94	3.50	336	2.91	1.19	81
37: 8:6	51	13.0	32.8	.90	490	14.70	5.97	3.32	355	2.95	1.13	85
38: 2:1	52	14.2	32.7	.89	299	10.19	4.46	3.34	245	1.48	1.01	13
39: 2:2	52	16.2	32.5	.76	561	30.77	14.32	6.74	806	4.78	2.63	111
40: 1:6	59	11.2	32.8	.79	457	14.53	6.82	3.89	362	2.21	1.22	80
41: 0:3	52	15.2	32.6	.80	529	30.87	13.84	6.46	796	4.68	2.57	102
42: 4:0	49	13.2	32.9	.78	377	13.80	5.52	3.38	285	1.79	1.08	41
43: 0:6	53	10.9	32.9	.78	317	10.13	4.73	3.88	249	1.53	1.04	18

高圧神経症候群系の構成

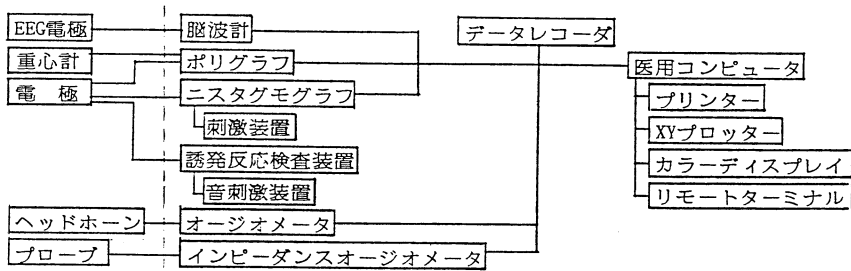


図9 HPNS系構成図

現で特徴づけられている。しかし HPNS の発症機序は未だ解明されていない。飽和潜水の課題である HPNS に対処すべく、その検出システムを組み立てた。図9にその構成図を示す。HPNS に関係する測定項目は脳波、振戦、眼振、重心動揺など多項目にわたり、その解析にあたっては総合的な判断が必要と考えているが、特に脳波活動に重点を置き、徐波出現部位の同定ならびにその出現量と環境圧との関連から HPNS の検出を確立するため、等電位分布(トポグラフ)をリアルタ

イムで表示可能とした。

このシステムの問題点はチャンパーと脳波計の間がケーブルにして約15mあり、その間に5個のコネクターを介していることからノイズや減衰が発生することである。この問題はケーブルを電線管に入れること、チャンパー機側にプリアンプを設けること、及び脳波専用の貫通コネクターを使うことで解決した。

脳波計は将来テレメトリーの導入を考え、日本光電 EEG-4321 とした。又、医用コンピュータ(日

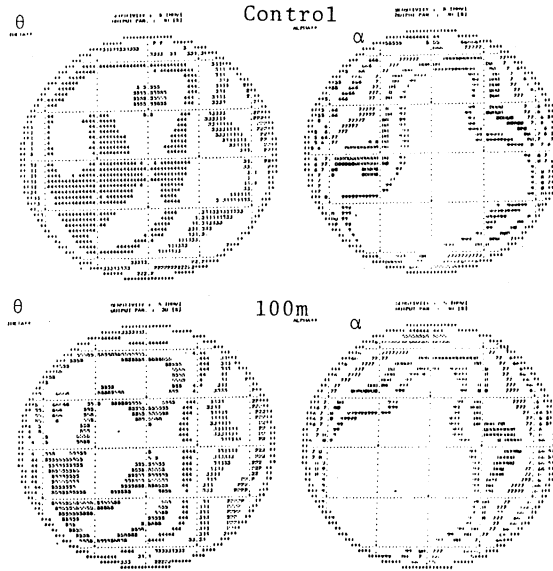


図10 HPNS 系トポグラフの表示例
(上段大気圧 Air, 下段 100mHe-O₂)

本光電 ATAC-450)の導入によって、等電位分布など種々のデータ解析を可能とした。図10は100mのトポグラフの1例である。

このシステムには平衡機能検査、聴力検査、神経一筋機能検査も可能なように、グラビコーダ、オージオメータ、誘発反応検査装置などを整備した。特にインピーダンスオージオメータ(DANAC-40)は高圧ヘリウム酸素環境下でも測定可能なものに改良中である。

このシステムはHPNSのみならず減圧症の発症の検出にも利用できる。

4. 集中データ処理装置

これらの3系統をまとめデータ処理をするためコンピュータ(日本データゼネラル Desktop Generation Model 30)を導入した。現在、このコンピュータは体熱損失系についてはオンラインでデータ入力及びデータ処理を可能としている。また潜水員の個人ファイルを作成し、種々のデータを入力し、潜水員全員の健康管理に役立てようとしている。

おわりに

この深海潜水シミュレーターは三菱重工(神戸)の手によって建造された。EBIPSは60年10月に行

った100m飽和潜水で初めて稼動し、ソフトの改善を残しているが、ほぼ満足する性能を発起した。このシステムはその拡張性を有するところから、ソフトの開発にともなって、機能の発展性が期待できる。

今後、このシミュレーターは飽和潜水訓練に使用するとともに、1.飽和潜水の生理・心理学的研究、2.短時間潜水(Bounce dive)の減圧の安全性、3.潜水装備品の人間工学的研究、4.空気飽和潜水の減圧の安全性、などについて研究を進めるために利用する予定である。

[参考文献]

- 1) Brathwaite, W.R.: Biomedical instrumentation for the 1973 EDU Dive to 1,600 feet, NAVXDIVINGU Report 6-74, Navy experimental diving unit, Washington, D. C., 1974.
- 2) Galerne, A., et al: Monitoring Techniques, Shilling, C. W., and M.W. Beckett (ed), National plan for the safety and health of divers in their quest for subsea energy, Bethesda Maryland, Undersea Medical Society, Inc., 1976, 4T-i-4T-14.
- 3) Lundgren, C.E. G. (ed): Monitoring vital signs in the divers, Bethesda Maryland, Undersea Medical Society, Inc., 1978.

- 4) Webb, P.: Body Heat Loss in undersea gaseous environments, *Aerospace Med* 41:1282-1288, 1970.
- 5) Bradley, M.E.: A new method for measuring pulmonary ventilation, Lundgren, C.E.G. (ed), *Monitoring vital signs in the diver*, Bethesda Maryland, Undersea Medical Society, Inc., 1978, 59-61.
- 6) Bennett, P.B. and E.J. Towse: The high pressure nervous syndrome during a simulated oxygen-helium to 1500 ft, *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 31:383,1971.
- 7) 小此木国明, 大橋光夫, 大岩弘典, 高圧ヘリウム酸素環境下の体熱平衡, *日本高気圧環境医学会雑誌*, 19(1), 99-102, 1984.