

潜水機照明灯用「メタルハライドランプ」の開発

渡辺 正之^{*1} 川名 生修^{*1} 青木 太郎^{*2}

「メタルハライドランプ」は、水銀ランプの放電ガス内に金属ハロゲン化物を添加する事により光エネルギー変換効率・演色性を改善したランプであり、陸上では、高性能ランプとして評価されている。

しかし、従来の「メタルハライドランプ」は寸法・重量とも大きく、また高い電圧を使用するために、水中照明灯としての応用は困難と考えられてきた。ところが、近年の革新的な技術発達により、陸上産業用に極めて小型で安価な「メタルハライドランプ」が一般市場に安定供給されるようになり、水中での応用が可能となってきた。

本研究では、陸上用に開発された最新の小型「メタルハライドランプ」を用い潜水機用の照明灯を試作し、海域試験等で性能の確認を行った。

キーワード：メタルハライドランプ，照明灯

Development of Metal Halide Lamp for the Use of Underwater Vehicle Lighting

Masayuki WATANABE^{*3} Ikuo KAWANA^{*3}
Taro AOKI^{*4}

The "Metal halide lamp" is a Mercury vapor lamp with improved light energy conversion efficiency and color rendering property, obtained by adding Metal halogenide to the luminous gas. It has been appraised as a high performance light on the shore.

The conventional type of "Metal halide lamp" was considered to be unsuitable for usage in underwater lighting because of its large size and heavy weight. Also it requires higher voltage than a halogen lamp. But highly miniaturized and cheap "Metal halide lamp" has been introduced in the general market steadily for industrial use on the shore, because of the recent developments and technological innovations in this field. Therefore the lamp has become available for use underwater.

* 1 運航部

* 2 深海開発技術部

* 3 Ship Operations Department

* 4 Deep Sea Technology Department

In this study, we have manufactured the illuminating lamp for submersible vehicle as a test, using the latest model of compact type "Metal halide lamp" which was developed for the use on shore and we have confirmed its efficiency through field tests and other tests.

Key words : Metal halide lamp, Underwater lighting

1 はじめに

光は、海水中を伝播するとき空中よりも著しい吸収を受け、遥に大きく減衰する。特に波長の長い赤色側での減衰が大きいため、太陽光は水深30～50mではほとんど青一色に変化し、そして数百メートル以深では暗黒の世界となる。

このような暗黒の世界で活動し、TVカメラによる撮影、視窓からの目視観測さらにマニピュレータ等によるサンプリング作業を行う潜水機（無人探査機・有人潜水船）にとって照明装置は、極めて重要なものである。

照明装置として、白熱電灯・ハロゲンランプ・水銀灯・メタルハライドランプ等多くの光源が考えられるが、水中照明装置の光源は小型で軽量のハロゲンランプが主流であり、当センターの「しんかい2000」、「しんかい6500」、「ドルフィン-3K」、曳航体でも、ハロゲンランプを光源が使用してきた。ハロゲンランプの採用理由は潜水機の設計上、機体の軽量化が最優先され、軽量化が容易に図れると判断されたためである¹⁾。

近年、各潜水機の運航が円滑となり、潜航回数・時間が飛躍的に増加した結果、次の段階の要望として下記に示す質・量の改善が深海調査に対し望

まれている。

①良質な科学的画像記録（良質な照明と光量の増加が必要である）。

②長時間且つ広範囲の調査（航走距離を増す必要上、推進器以外で省エネを講ずる必要がある）。

この要望に対する一つの答えとして「メタルハライドランプ」を光源とする照明装置が挙げられる。「メタルハライドランプ」は表1から明らかなように、太陽光に次ぐ優秀光源で省エネ効果が高く、かつ良質な照明効果を得ることができる光源である²⁾。

最近、陸上における照明の技術革新の結果により、効率が高く、高演色性を持つ小型「メタルハライドランプ」が一般市場に安定供給されるようになってきている。

本書では、潜水機の調査能力の質・量の改善を目的に行い、市販されている150W「メタルハライドランプ」を使用した潜水機用水中照明灯（以下、本試作器という）の試作と、無人探査機「ドルフィン-3K」による実海域での試用試験等について報告する。

表 1 各種光源の性能比較

Table 1 Characteristics of various light sources

ランプの種類	形状	効率 (lm/W)	分光分布	色温度 (°K)	演色性	可視放射比率(%)	寿命	点 灯 法	放射の制御
ハロゲンランプ	小型	低い (18～33)	連続 赤成分大	2500～3200	優秀	8～14	短い	簡単	容易
高圧水銀ランプ	中	高い (35～65)	連続 青白色	4000～5700	可～良	13～16	非常に長い	安定器、始動容易	容易
蛍光ランプ	中～長大	高い (30～100)	連続 自由度大	2700～6500	良～優良	25	非常に長い	安定器、始動容易	困難
メタルハライドランプ	中	優秀 (70～95)	連続 白色	5000～5500	良	20～40	非常に長い	安定器、始動容易	容易
太 陽 光	——	——	連続 白色	5500	優良	40～45	非常に長い	——	困難

2 150W「メタルハライドランプ」潜水機用 水中照明灯の試作

2.1 「メタルハライドランプ」の概要と水中 使用上の問題点

「メタルハライドランプ」は、水銀ランプの一重で、石英バルブ中に水銀、希ガスとともに種々の金属ハロゲン化物を封入した放電形のランプである。構造は、発光管に直接または間接的に電極口金)を取りつけたものである。

ランプの性能は金属ハロゲン化物の組み合わせ・混合比等で変化し、用途に合わせ分光特性を調整することができる。単位消費電力に対する光変換効率 80 lm/W 前後と高く、光源の色再現特性の指数である演色評価数も80以上と優れた特性を示し、科学撮影用の照明装置として多くの利点を持っている(表1参照)。

しかし、放電ランプは特有の始動方法で点灯され、これに伴い始動装置が必要となり、軽量化が要求される水中機器への応用を難しくしている。

ここで、放電ランプ特有の始動法の概略及び水中応用上の問題点を説明する。(図1 ガス放電の電圧・電流特性参照)。

「メタルハライドランプ」の始動法は電源投入後、電流を増すとグロー放電領域に入り、電圧は一定となる。更に電流を増すとグローが陰極を覆い、電流の増加は電流密度の増加となり、電圧も増加して正特性となる。電流密度の増加に伴い陰

極温度が上がり、P点に達して陰極の熱電子放出が始まり、アーク放電領域に達した後、更にA点で安定した点灯状態となる。

次に、「メタルハライドランプ」始動に伴う、水中応用上の問題点を以下に示す。

問題点1：アーク放電領域では、熱電子放出のため低い陰極降下電圧となり、負抵抗を示す。この負抵抗領域で、一定電圧電源からの放電を安定に維持するためには、正特性を持った回路素子でバランスさせる安定器が必要である。

一般に交流電源を用いる場合、安定器はチョークコイルが用いられる。この安定器は重くそして大きく、搭載重量に制限がある潜水機に搭載するためには、極端な軽量化(例えば電子化)を図る必要がある。

問題点2：ランプを点灯させるためにはアーク放電領域のA点の状態にする必要があり、始動するために少なくともP点の電圧・電流以上のエネルギーの供給を行わねばならず、点灯安定時以上の電圧が必要となる。このため、ピーク点Pを下げるか、始動時のみP点以上の電圧を与えるための始動補助機構が必要であり、ランプの小型化が難しくなる。

始動補助機構としては、ランプ内に補助電極を設け始動時に電極との間に局部グロー放電を起こさせる方式(補助電極方式)、電源電圧に高電圧パルスを重ねて、低い電源電圧で始動する方式がある。(イグナイター方式=高圧パルス発生器方式)

この他に「メタルハライドランプ」は点灯方向が指定され、指定方向以外で使用した場合、電圧・効率・発光色・寿命等の性能が変化してしまう機種がある。このため、潜水機への取り付け方が制限され、使い勝手が悪くなる。

このように従来型の「メタルハライドランプ」は高性能である反面、潜水機に使う場合には幾つかの問題もあり、この点を十分ふまえて開発をする必要がある。

1.2 「メタルハライドランプ」の機種選定

「メタルハライドランプ」を水中用照明灯として応用するため、以下の設計コンセプトにしたがい、機種の選定を行った。

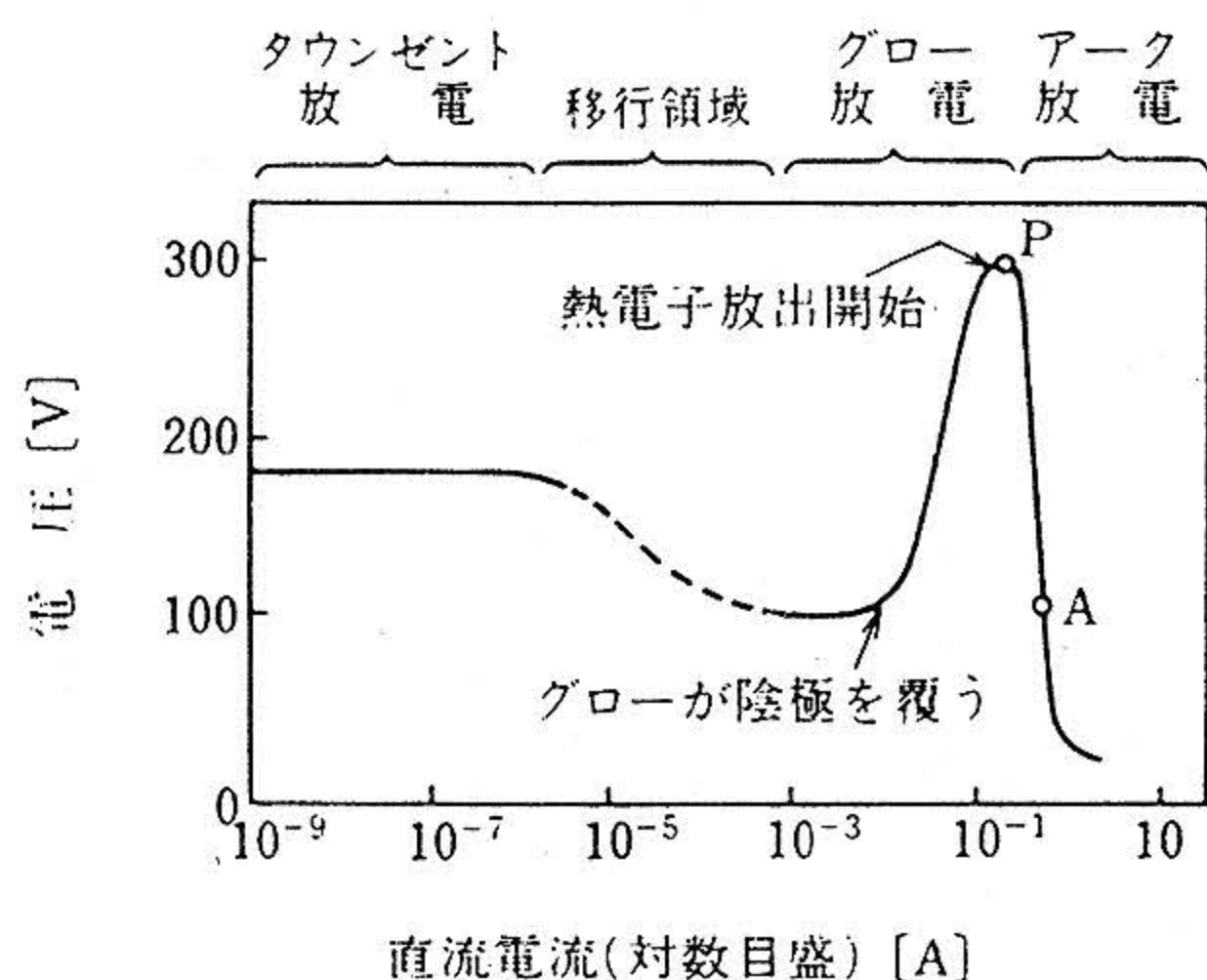


図1 ガス放電の電圧・電流特性

Fig. 1 Electric characteristics of glow discharge and arc discharge

- ①小型・軽量化ができること（補助電極を用いないもの）。
- ②振動等で簡単に破損しないこと。
- ③点光源に近いランプで配光制御が自在であること。
- ④絶縁対策が容易であること（市販の水中ケーブルが使用できること）。
- ⑤耐熱設計が容易であること。
- ⑥ランプ保護用耐圧硝子は、「しんかい6500」の部品が使用出来るもの。
- ⑦点灯方向の指定がなく、潜水機への取り付けが自由であること。
- ⑧消費電力は500W以下のもの（交流電源で運転できること）。
- ⑨演色性が良いこと（自然光に近い光が得られること）。
- ⑩効率が良いこと。
- ⑪寿命が長いこと。
- ⑫市販品で、安定した供給が受けることができ、安価であること。

以上の条件を満たす「メタルハライドランプ」として、最近開発された小型「メタルハライドランプ」三菱電機オスラム㈱のHQI-T（写真1）を試作器の光源に選定した。ランプ・安定器の仕様（表2-1，表2-2）及びスペクトル分布（図2）を示す。（併せて、比較できるように当セ

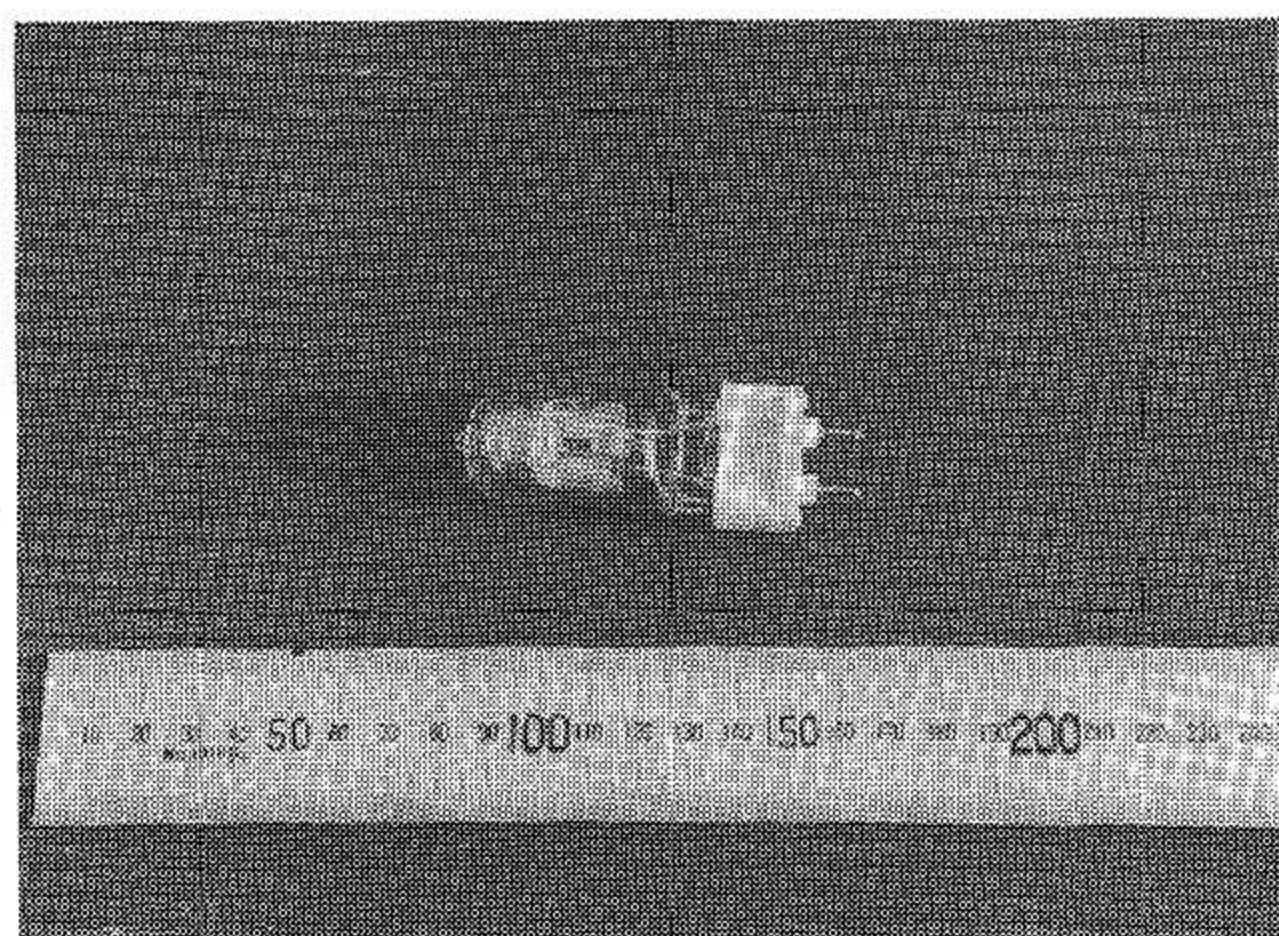


写真1 選定ランプ機種

（三菱電機オスラム㈱ HQI-T）

Photo 1 HQI-T “Metal halide lamp”

(Produced by MITSUBISI OSRAM Corp.)

ンター保有潜水機使用「ハロゲンランプ」の仕様も示す）。

1.3 潜水機水中照明灯用「メタルハライドランプ」の試作器

本試作器は、ランプ本体・口金（ランプソケット）・安定器・イグナイター（高圧パルス発生器）。これらを格納する2つの耐圧容器（ランプ本体用耐圧容器及び安定器用耐圧容器）・水中ケーブル（プラグ・レセプタクル）並びに反射板から構成される。

ランプ本体・口金・安定器・イグナイター（高圧パルス発生器）と水中ケーブル（プラグ・レセプタクル）は市販品を利用し、一部改造を行って絶縁・耐熱対策ができるようにレイアウトした。（図3にシステムブロック，図4にランプ点灯回路を示す）。特にピーク時に約3000～5000Vの高電圧を発生するイグナイター（高圧パルス発生器）に対しては、ランプと同じ容器に格納することにより、高電圧対策を行なった。更にイグナイターを小型化するため、新規に基板を作製して、サイズを約1/3まで小型化した（写真2）。このイグナイターの小型化で、ランプ本体用耐圧容器の小型化が可能となった。

また、安定器に関しては、電子化を行い軽量化を図るべきであるが市販品がなく、このため、メーカー標準品の力率改善型の安定器（チョークコイ

Relative Spectral Power Distribution

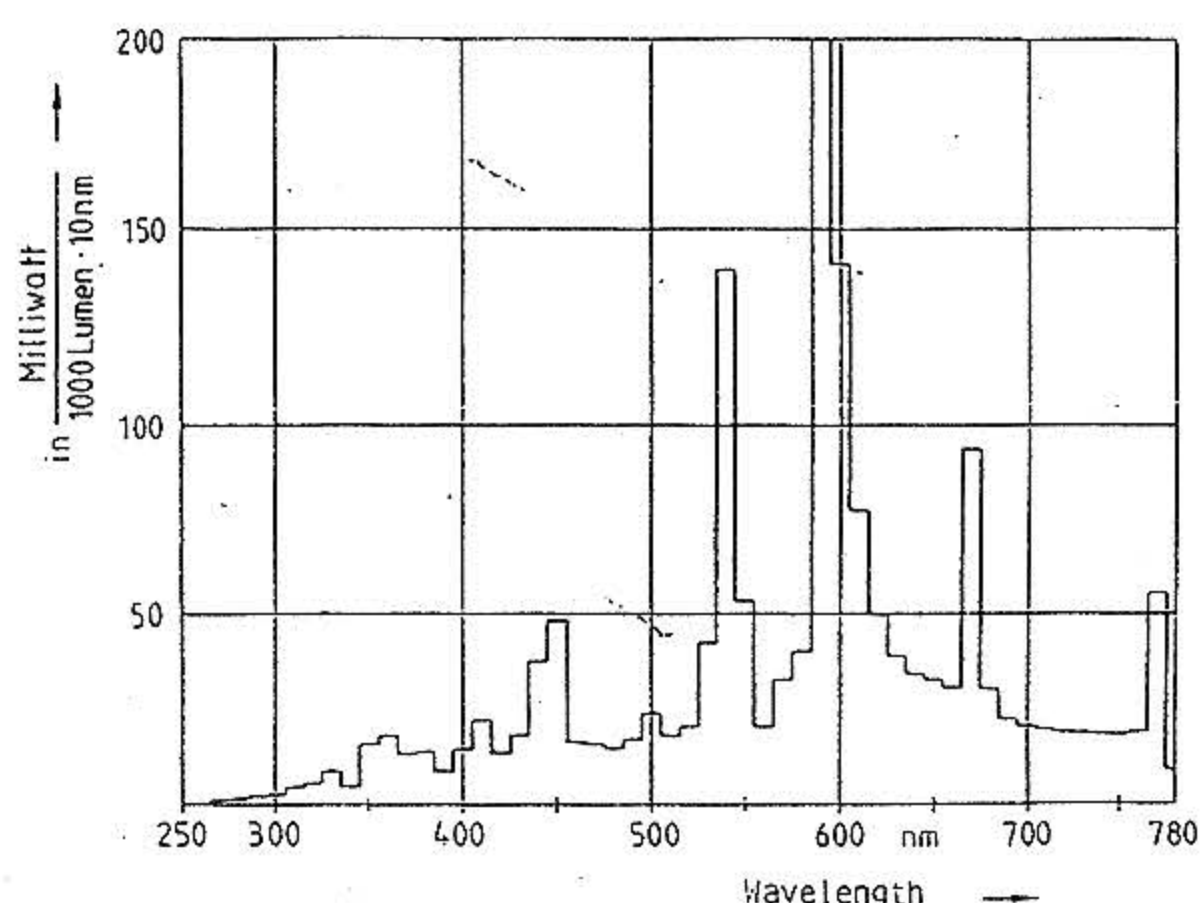


図2 スペクトル分布図

Fig. 2 Optical power spectrum of HQI-T lamp

表 2-1 HQI-T ランプ本体の仕様

(併せて当センター保有潜水機使用「ハロゲンランプ」の使用も示す。)

Table 2-1 Specifications of HQI-T "Metal halide lamp"

(Specification of "harogen lamp" uses in JAMSTEC's underwater vehicles are also shown for comparison.)

ランプ本体仕様

形 式 名 又は潜水機名	HQI-T150W/WDL(WDL は発光色が自然温白色であることを示す)	「しんかい2000」用 500W投光器ハロゲンランプ	「ドルフィン-3K」用 300W投光器ハロゲンランプ	曳航体用 250W投光器ハロゲンランプ
定 格 電 力 (W)	150	500	300	250
ラ ン プ 電 流 (A)	1.8	—	—	2.58
ラ ン プ 電 圧 (V)	95	120	100	100
全 光 束 (lm)	12000	9500	3850	4500±450
効 率 (lm/W)	80	19	13	17
平均演色評価数 (Ra)	80	—	—	—
色 温 度 (°K)	3000	—	2900	2900
平 均 寿 命 (時間)	6000	1000	2000	1800
点 灯 方 向	任意	任意	任意	任意
外 形 寸 法 (mm)	84(H)×25(D)×56(L)	—	—	—
口 金 (ソケット)	G12 (片口金タイプ)	片口金タイプ	片口金タイプ	片口金タイプ

表 2-2 安定器の仕様

Table 2-2 Specifications of electric ballast

安定器仕様

形 式 名		QH1.5H1A/B GB型 一般高力率 イグナイター別置き型*1
周 波 数 (Hz)		50/60
電 源 電 力 (V)		AC 100
入 力 電 流 (A)	無 負 荷 時	3.4
	始 動 時	2.4
	安 定 時	2.0
入 力 電 力 (W)		175
二 次 電 圧 (V)		230
二 次 短 絡 電 流 (A)		2.3
重 量 (Kg)		5.2
外 形 寸 法 (mm)		270 (L) × 86 (D) × 85 (H)
備考:		
*1: イグナイターはランプ本体脇に設置でき、高電圧を長い距離送電する必要がない。		

ル)を用いた。

次に、耐圧容器は以下の基準で設計した。

①小型化を優先する。

②ランプ保護用耐圧硝子は、「しんかい6500」の部品を使用する。

③材質は、高張力アルミニウム (A7075) とし軽量化を図り、防錆対策はタフラム処理を施す。

④耐熱対策 (放熱効果) を施す (特に、安定器用耐圧容器)。

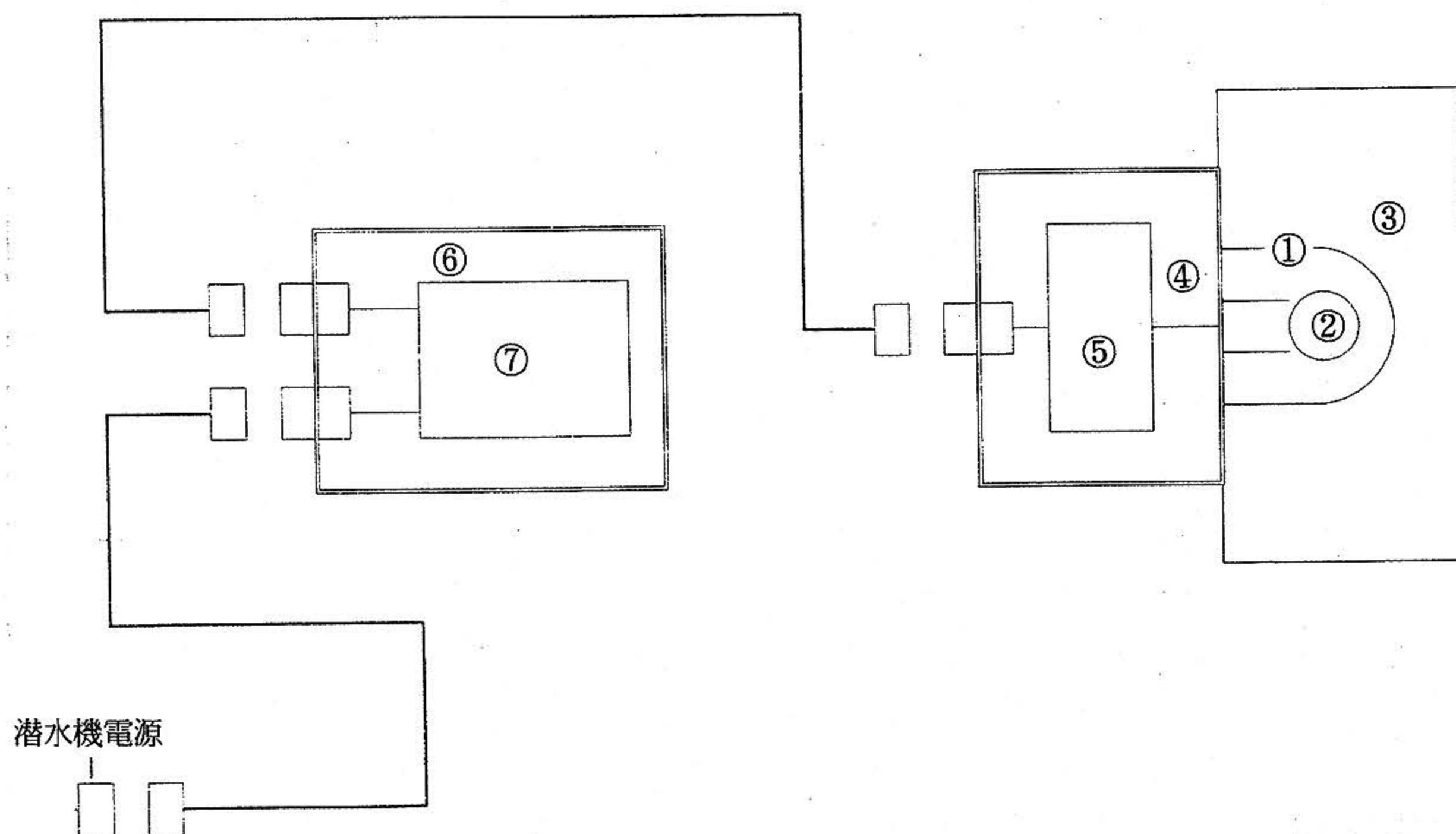
耐圧容器の設計用計算式は、船舶工学便覧の「内外圧を受ける薄肉・厚肉円筒の式³⁾」を用いた。

製作したランプ本体用耐圧容器 (写真3-1, 3-2) 及び安定器用耐圧容器 (写真4) の仕様を表3に示す。

この他に、反射板は「しんかい2000」ハロゲンランプ用の散光型反射板の形状を踏襲した。

2 陸上試験

実際に本試作器を潜水機に取り付ける前に、表4に挙げる陸上試験を行い、水中機器としての信



: 水中ケーブル
(プラグも含む。)

: コネクター
(レセプタクル)

①	ランプ保護用耐圧硝子	⑥	安定器用耐圧容器
②	ランプ本体	⑦	安定器
③	反射板	⑧	
④	ランプ本体耐圧容器	⑨	
⑤	イグナイター (高圧パルス発生器)	⑩	

図 3 システムブロック図

Fig. 3 Block diagram of "Metal halide lamp" system

頼性を確認した。

また、実海域での試用試験後、研修用大型プールで配光特性の計測及び本試作器とハロゲンランプの光量を計測し、単位電力当たりの効率の比較を行なった。比較用のハロゲンランプは、本来なら消費電力150Wのランプを用いて同じ条件で比較を行うべきであるが、水中用の同仕様のランプが無いので、「ドルフィン-3K」用の250Wのハロゲンランプを使用した。計測器は石川産業㈱製の水中照度計 (IU-2B) を使用した。

2.1 配光特性試験

撮影を行なう上で照度分布を知っておくことは

不可欠であり、反射板を含めた照明灯の特性を確認するために、配光特性試験を行った。

計測方法は、本試作器を分度器付の回転台 (三脚付) に取り付け、距離 1, 2, 3, 4 m に照度計を配置し、ランプを10° 毎に回転させて照度を計測した。本試作器を回転台に縦と横置きに取り付けることで、それぞれの照度分布を計測した (図 5)。

計測の結果は、図 5 に見られるように横方向は±50° まで広範囲に平均的な照度で照明しておりまた縦方向は、指向性が強い配光となっていることが確認できた。

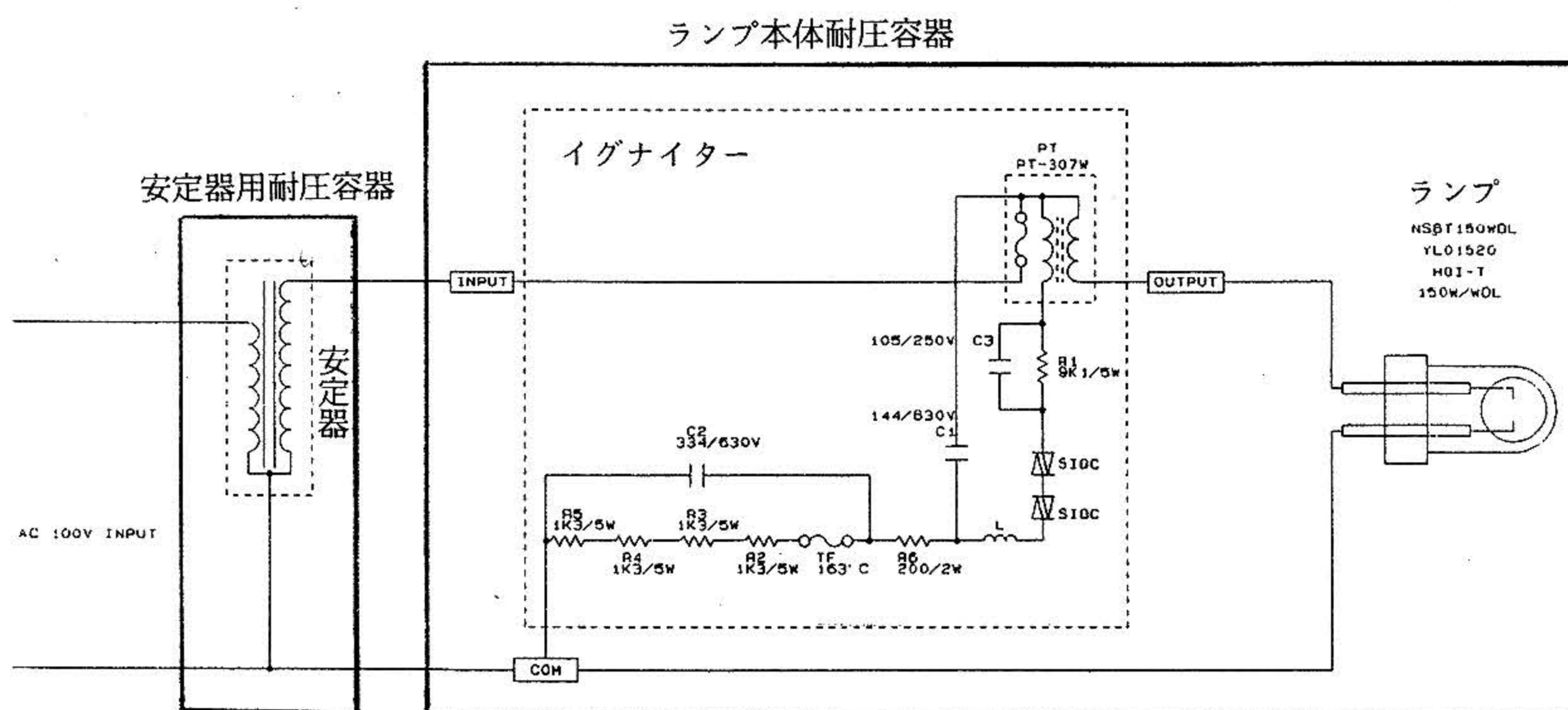


図 4 ランプ点灯回路

Fig. 4 Circuit diagram of "Metal halide lamp" system

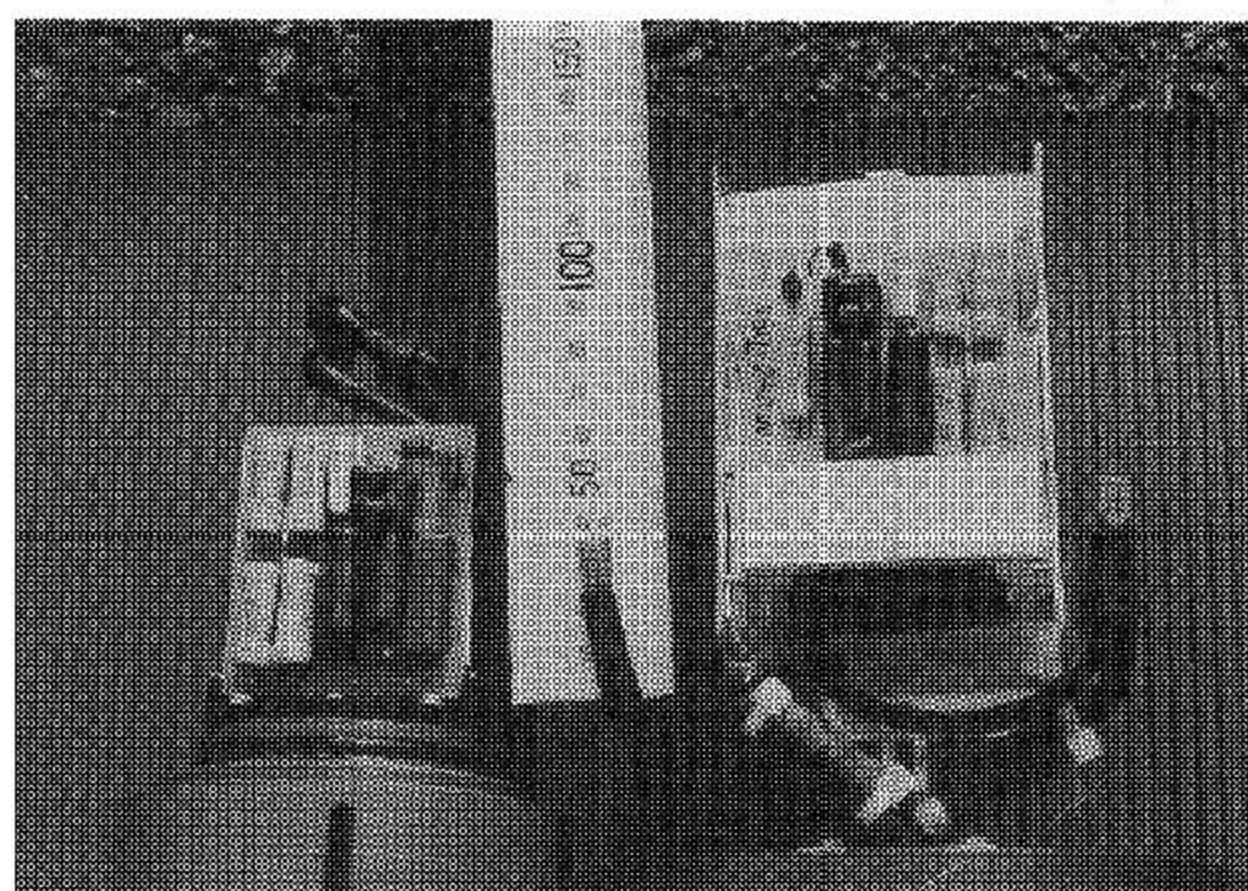


写真 2 イグナイター (左 ; 改造後, 右:改造前)
Photo 2 Ignitor (leftside : modified Ignitor, rightside : original Ignitor)

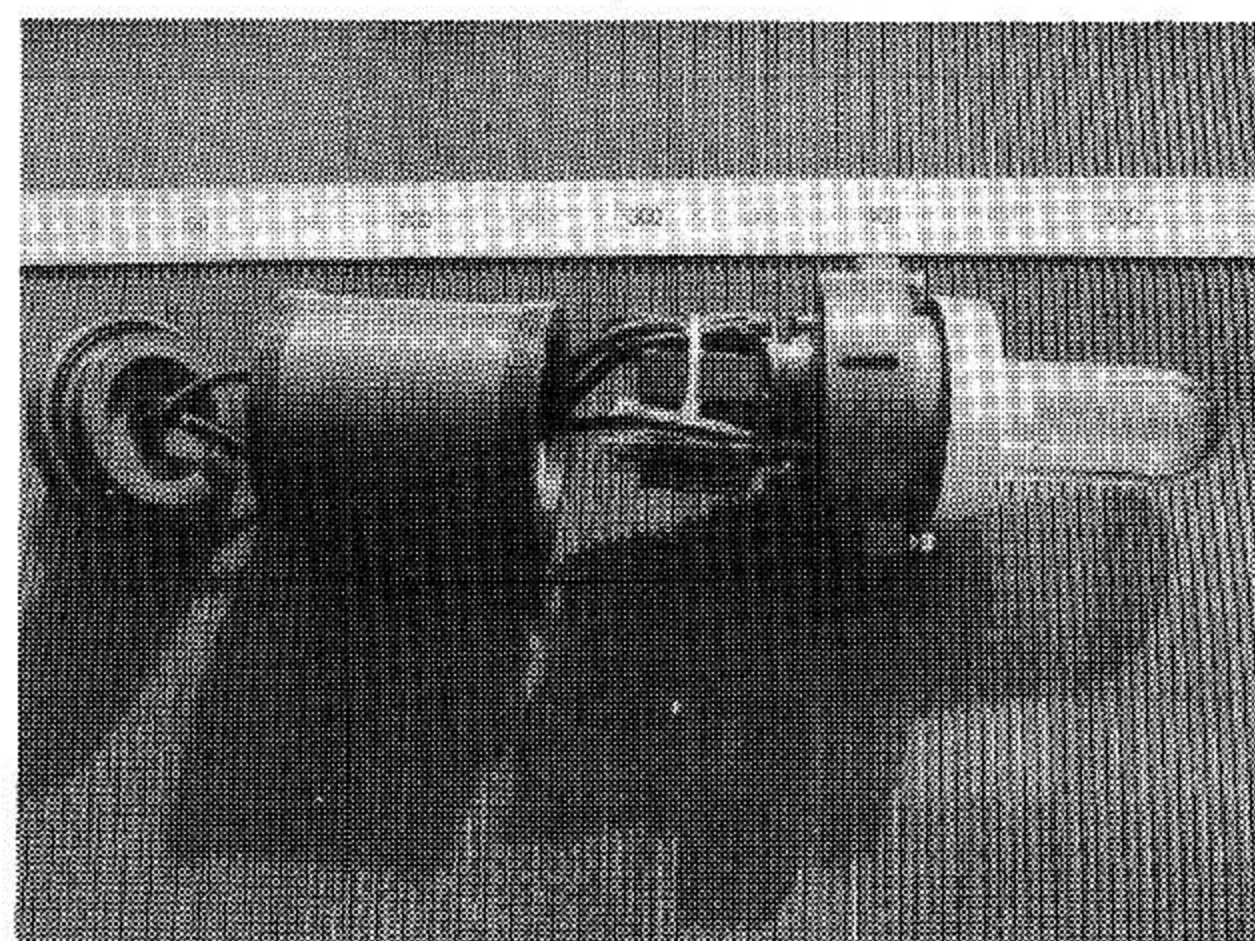


写真 3-2 ランプ本体用耐圧容器内部
Photo 3-2 Inside of pressure housing for the lamp unit

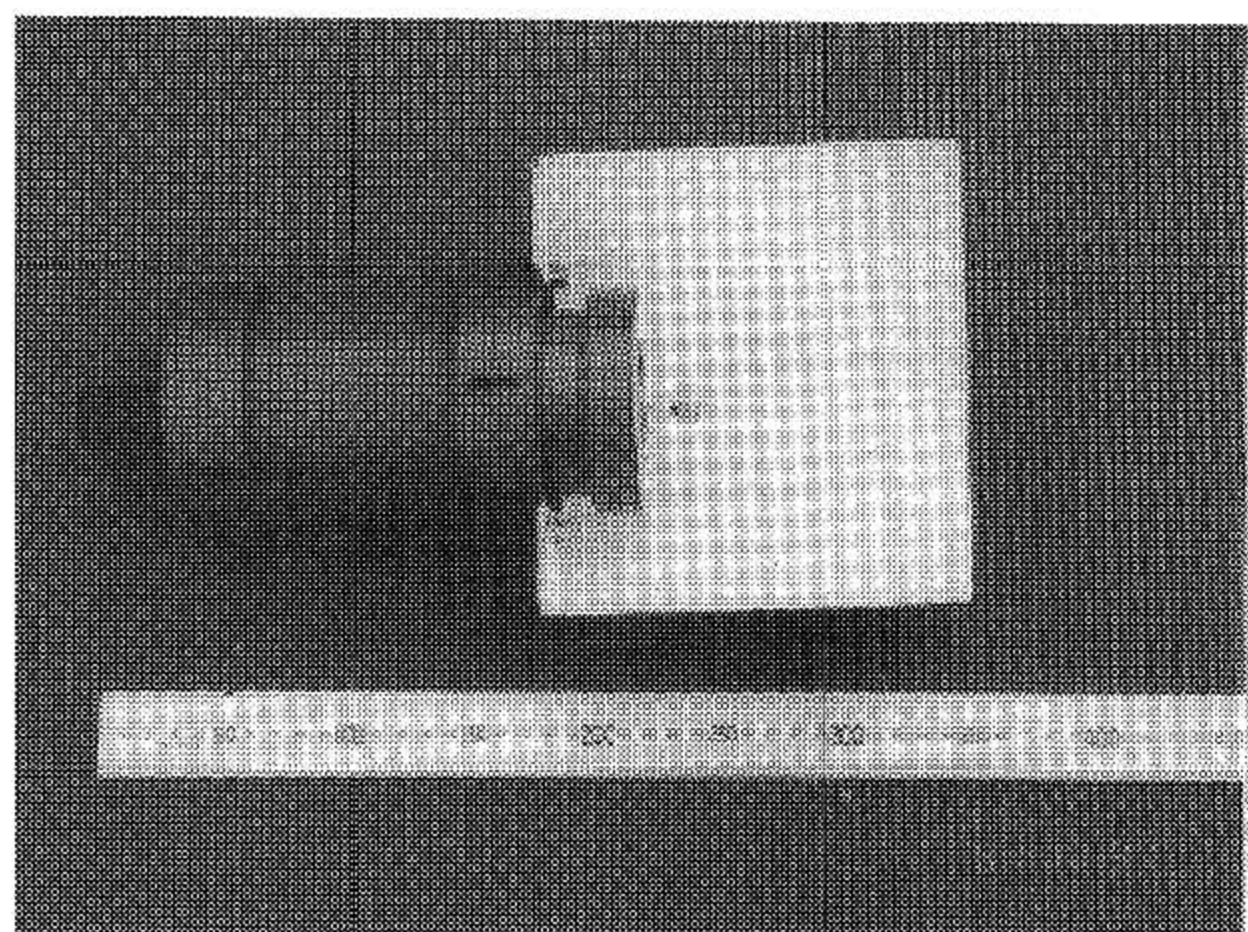


写真 3-1 ランプ本体用耐圧容器
Photo 3-1 Pressure housing for the lamp unit

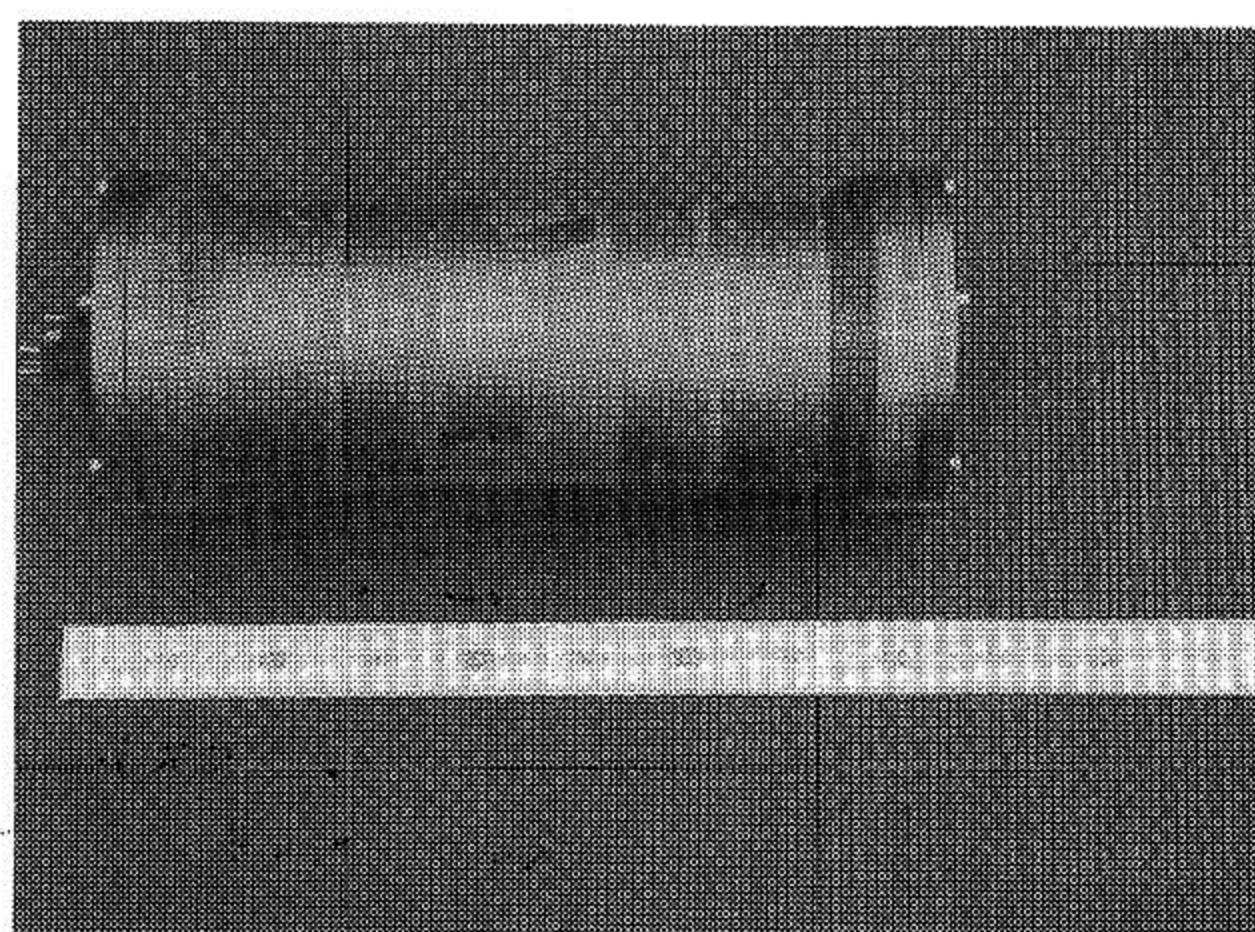


写真 4 安定器耐圧容器
Photo 4 Pressure housing of electric ballast

表 3 耐圧容器仕様一覧

Table 3 Specification of pressure housing

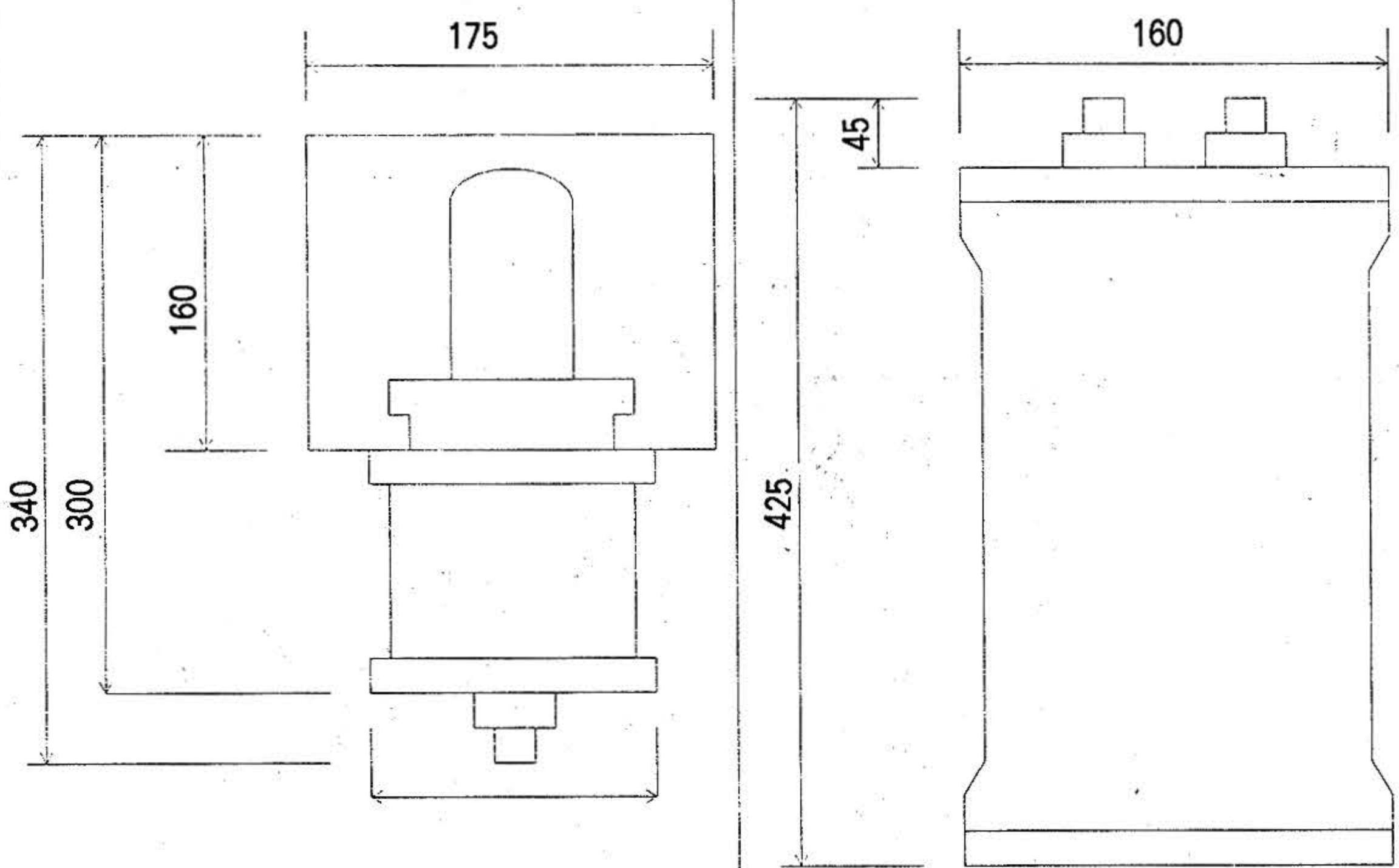
	ランプ本体用耐圧容器	安定器用耐圧容器
耐圧性能	750kg/cm ² (但し、確認試験は650kg/cm ² で行った。)	400kg/cm ² (但し、確認試験は350kg/cm ² で行った。)
空中重量	3.8 Kg	11.4 Kg
水中重量	2.2 Kg	5.5 Kg
		

表-4 陸上試験記録一覧

Table 4 Results of on-shore performance tests

試験項目	試験日付	試験環境	点灯時間	作動状況	備考
ランプ本体耐圧容器耐圧試験	91年10月 2日	652kg/cm ²	——	良好	652kg/cm ² の試験2回 (最高圧力の保持時間10分)
耐環境点灯試験	91年10月17日	水温 21°C	5時間40分	異常無し	流水中での点灯試験・同時に絶縁・耐熱性能等の試験を行った。
耐環境点灯試験	91年10月18日	水温 19°C	6時間03分	異常無し	流水中での点灯試験・同時に絶縁・耐熱性能等の試験を行った。
耐環境点灯試験	91年10月21日	水温 5°C	5時間30分	異常無し	氷水中での点灯試験・同時に絶縁・耐熱性能等の試験を行った。
耐環境点灯試験	91年10月18日	水温 5°C	5時間40分	異常無し	氷水中での点灯試験・同時に絶縁・耐熱性能等の試験を行った。
合 計		——	22時間53分間		

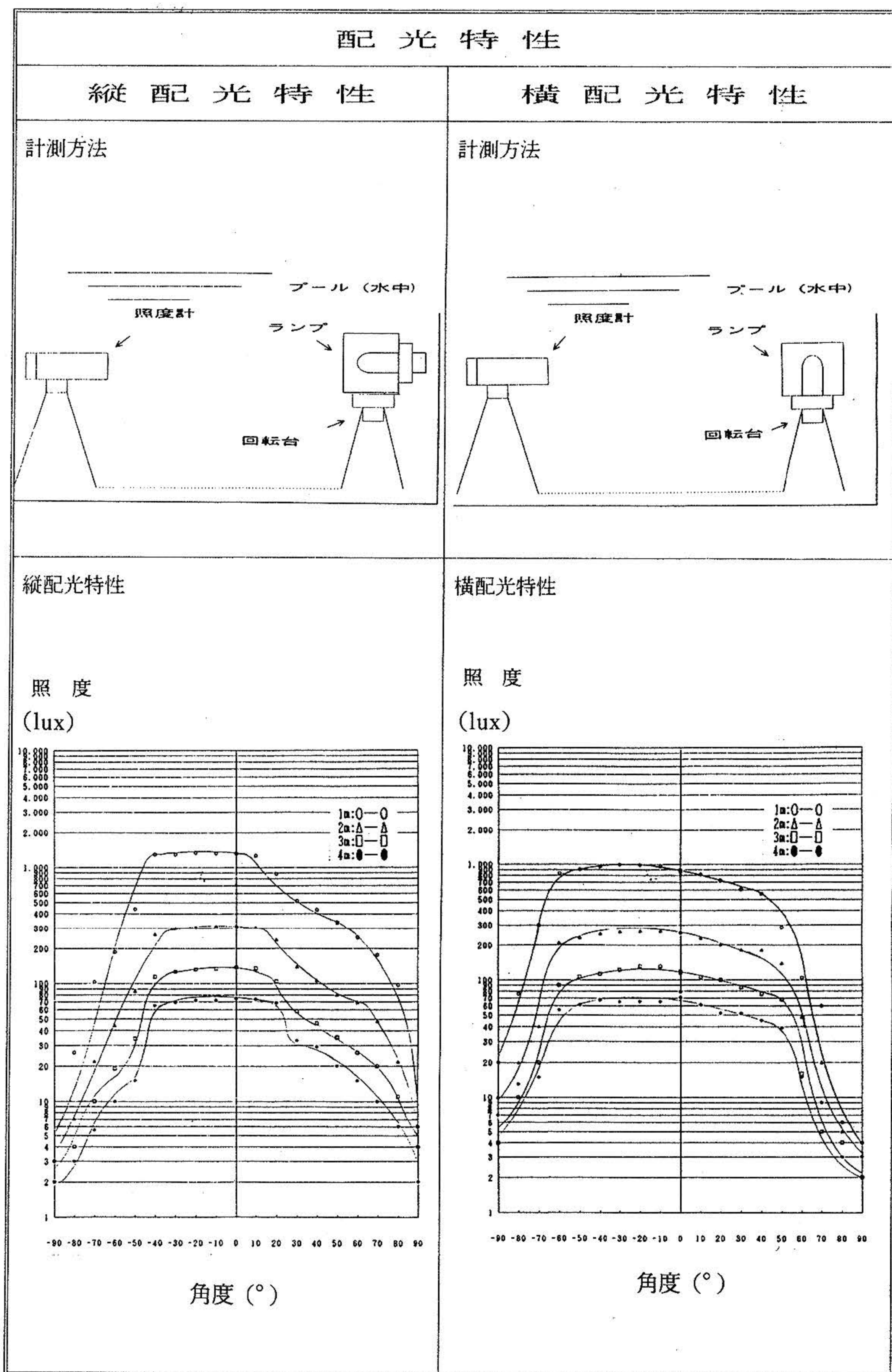


図 5 配光特性

Fig. 5 Luminous intensity distribution characteristics

2.2 光量の比較試験

「メタルハライドランプ」単体の性能は、仕様の上で確認できるが、実際耐圧容器に格納し、かつ水中で使用したときの性能についてはデータがなく、確認する必要があった。

その計測方法は、反射板の特性を排除するために反射板を取り外したランプを三脚に取り付け、距離1～10mの間を1m間隔に照度計を配置し照度を計測した。計測対象は250W「ハロゲンランプ」と本試作器とし、それぞれのデータを採った(図6)。

計測により得られた250Wハロゲンランプと本試作器の照度を比較した結果、「メタルハライドランプ」は「ハロゲンランプ」の約3倍の効率で照明できることが明らかになった。

3 試用試験

試用試験は、本試作器を実際に使用する過酷な環境に置くことで、実用面の信頼性と問題点を確認する目的で行なった。これに併せ「ハロゲンランプ」との性能比較試験も行なった。

試用試験は、無人探査機「ドルフィン-3K」に取り付け、平成3年11月3日から11月7日まで5日間延べ5潜航行なった(表5)。この間、本試作器は故障もなく、実際の運用でも、機器の安全性及び信頼性を保つことが確認できた。また、試用試験終了後、各部の外観点検及び各耐圧容器を開放して内部点検を行なったが、絶縁破壊や熱による破損等の異常はなかった。

「ドルフィン-3K」への取り付け位置は、写真5に示すようにビークル前部のフェンダー上の3板式CCDカラーカメラの正面近くに取り付け、また配光の中心がビークル前方約2～3mになるように傾けセットした(写真5)。これに併せランプ性能の比較を行うため、250W「ハロゲンランプ」も同様に、本試作器の脇に取りつけた(250Wハロゲンランプの性能は表2を参照)。

3.1 ランプ性能試験

3.1.1 色再現性の比較試験

実海域においてランプの性能を定量的に評価するためには、環境等(海水の透明度・底質を含めた浮遊物)の影響を定量的に把握する必要があり、照度計等の計測器が必要となる。しかし、この計

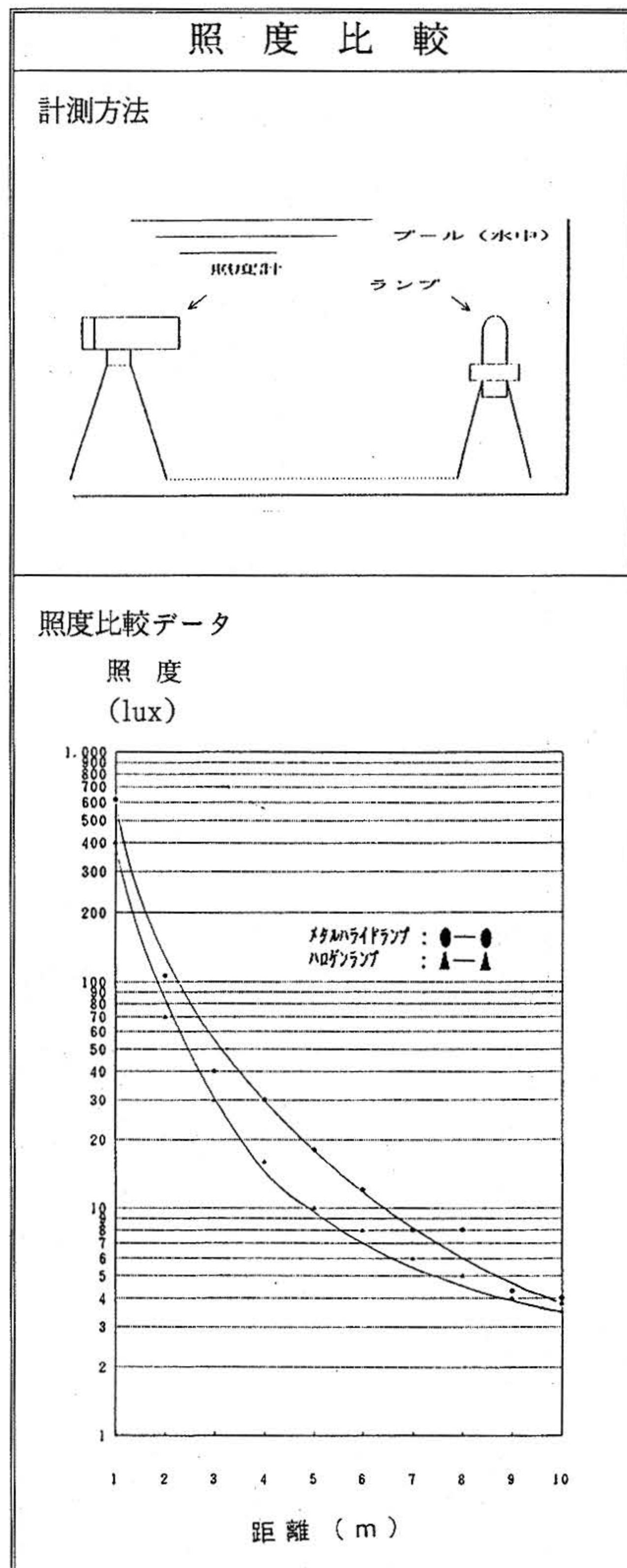


図-6 250Wハロゲンランプと150Wメタルハライドランプの照度比較

Fig. 6 Illuminance of 250W "Halogen lamp" and 150W "Metal halide lamp" (HQI-T lamp)

表 5 試用試験記録一覧

Table 5 Results of sea trials

試験日付	ドルフィン-3K通算潜航回数	潜航深度	潜航時間	ランプ使用時間	作動状況	備考
91年11月 3日	#126DIVE	約 100m	4時間37分	4時間16分	良好	点灯試験、浮上後耐圧硝子増し締め
91年11月 4日	#127DIVE	約 1200m	5時間13分	——	異常無し	耐久試験
91年11月 6日	#128DIVE	約 100m	2時間15分	——	異常無し	耐久試験
91年11月 7日	#129DIVE	約 1200m	2時間50分	2時間37分	良好	ハロゲンランプとの比較試験
91年11月 7日	#130DIVE	約 1200m	1時間49分	1時間47分	良好	点灯試験
合 計	5 潜 航	——	16時間44分間	8時間40分間		

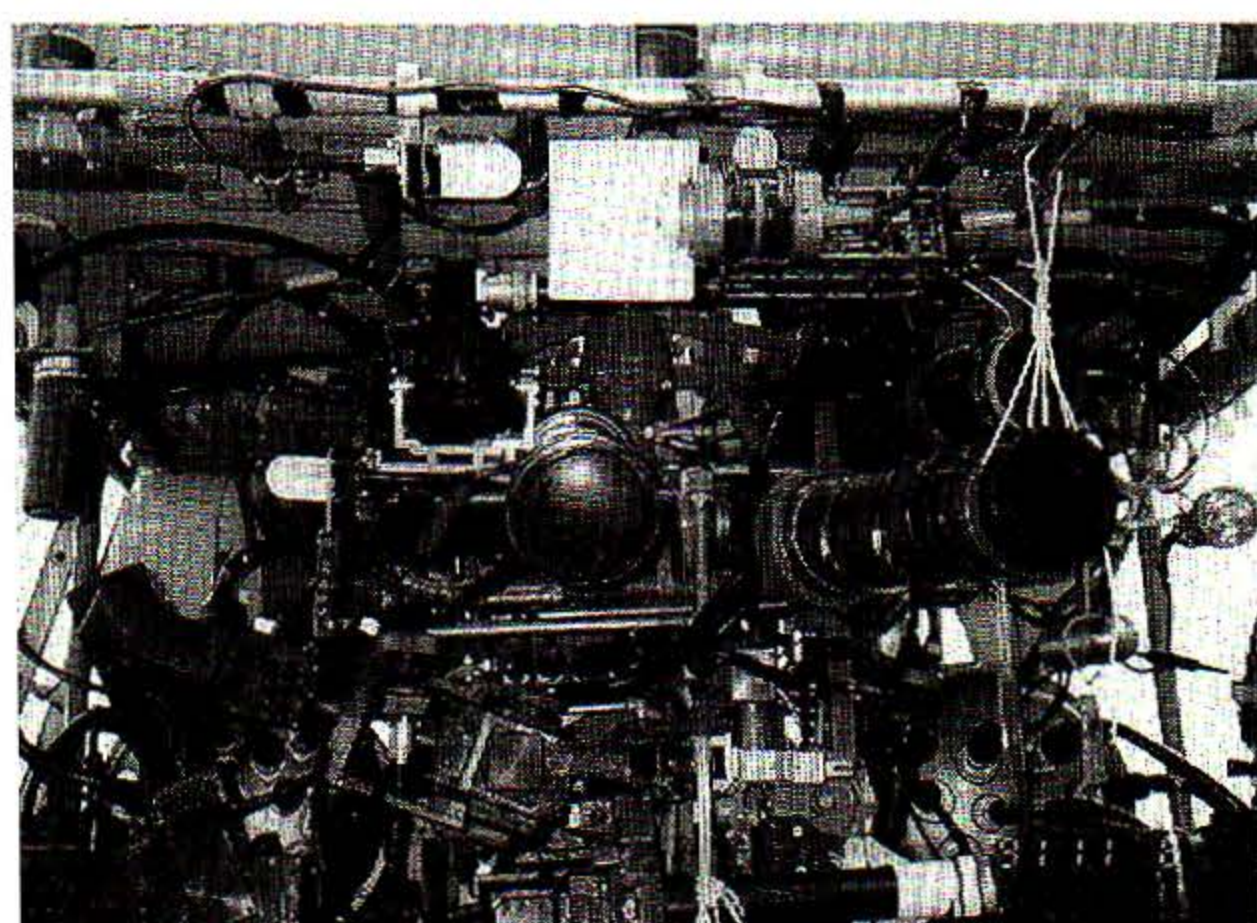


写真 5 「メタルハライドランプ」 ビークル搭載状態（中央部に 3 枚式 CCD TV カメラとその上に右に「メタルハライドランプ」、左に「ハロゲンランプ」が見られる。）

Photo 5 Installation of Metal halide lamp on Vehicle (Arrangement of 3 CCD TV camera and 250W "halogen lamp", 150W "Metal halide lamp" (HQI-T lamp))

器等をマニピュレーターでハンドリングし、正に計測することは極めて困難である。このため、底での性能試験は、「ドルフィン-3K」に搭されている250W「ハロゲンランプ」と本試作との照明効果を比較し、評価することにした。比較方法は、水密性を持たせるためのラミネー加工したNTSC規格（=TVカメラの規格）にじた3原色（赤・青・緑）の色見本を作製し（写真6）、これを被写体として、カメラから距離2, 3, 4mと離して行き、3板式CCDカラー

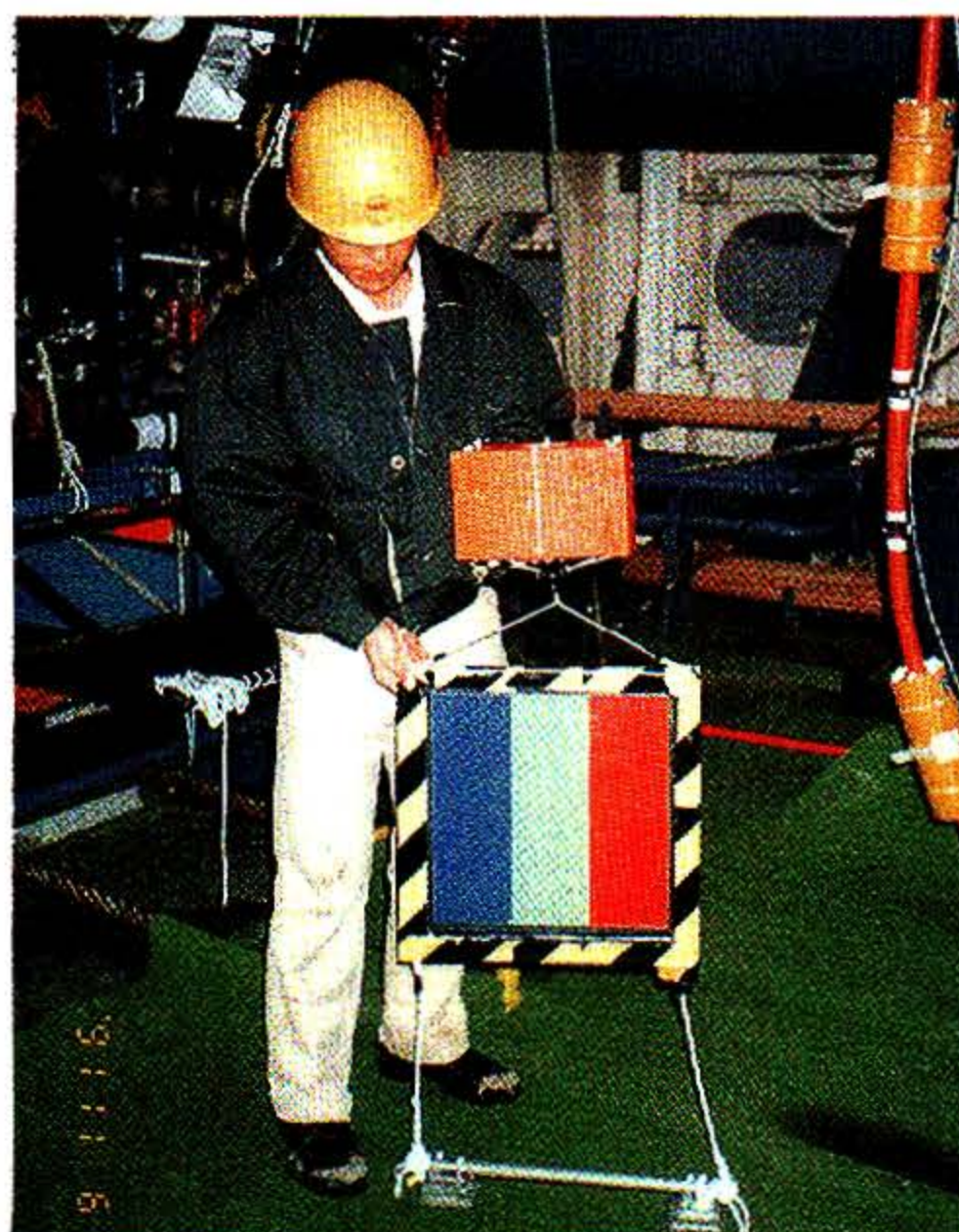


写真 6 色見本（RGB色見本）

Photo 6 RGB color standard sample

カメラ（IK-T30C）で撮影し、TV画像上での色見本の明るさ及び色見本の色再現性が比較できるようにした（図7、写真7、色の変化は文末の写真8に示す）。また、同時にビデオデッキでこのTV画像の記録を残した。この他、カメラレンズのアイリス調整（絞り）は各距離毎に調整し、カメラ自身の能力を最大に引き出し、3原色の色再現性の比較確認も行った。

3.1.2 色再現性の比較試験結果

以下に結果を示すが、③の評価はカメラの能力（最低被写体照度）に大きく影響されている。

①写真8を見て分かるように、本試作器は「ハロゲンランプ」に比べ確実に明るかった。

②本試作器は「ハロゲンランプ」に比べ色が鮮やかである。



写真 7 ランプ性能試験状況（中央に色見本が見られる。）

Photo 7 Lamp performance test at the sea bottom

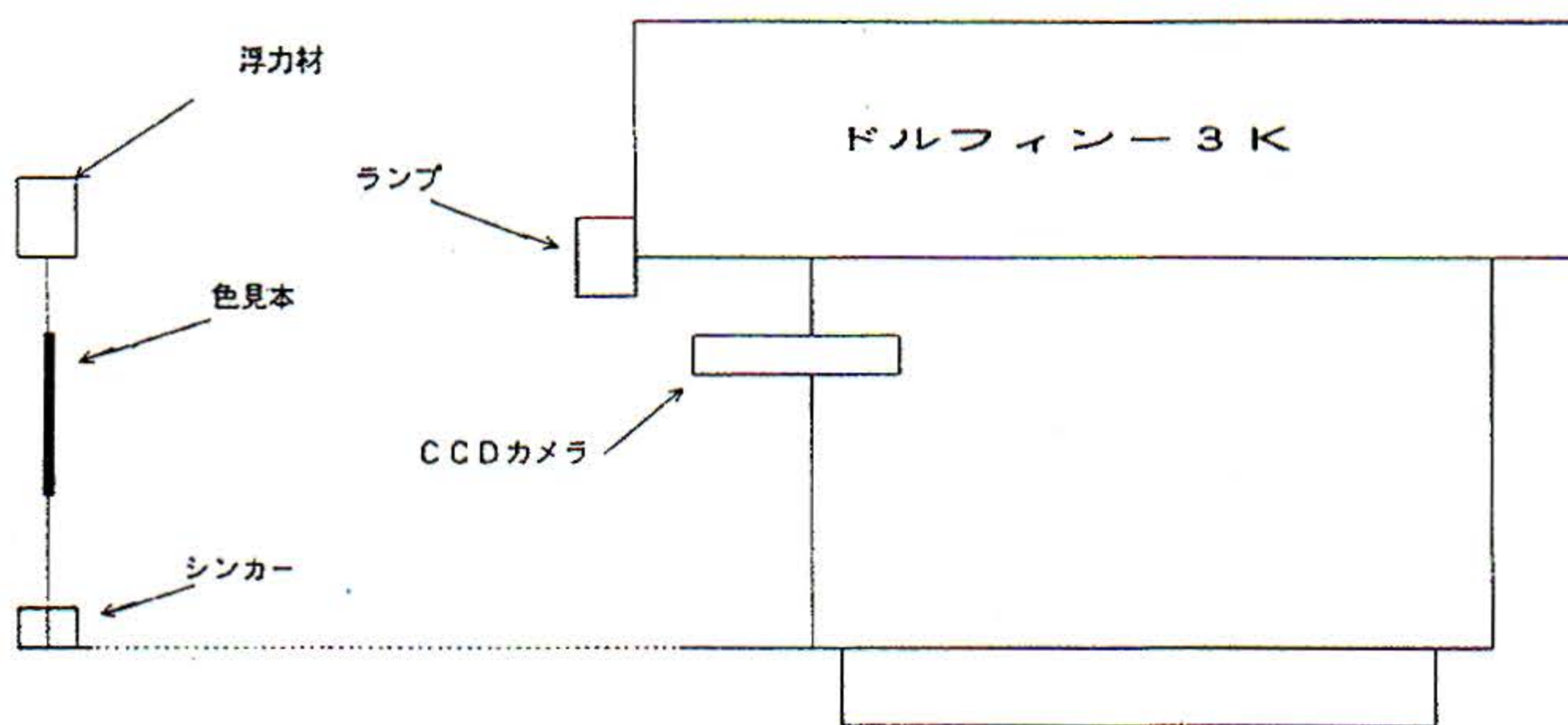


図 7 試験方法

Fig. 7 Concept of lamp's performance test at sea bottom

③本試作器の照明下で、4 mまで各原色が確認出来た。

3.2 その他の評価

今回の試用試験に対する（「メタルハライドランプ」に対する）「ドルフィン-3K」のオペレータから得られた評価は、次のとおりである。

①色が鮮やかになった。

②質感が出ている。

③「メタルハライドランプ」の照明では、被写

体がくっきり見えた。

④画面が、キラキラした感じがあった（放
ランプの特徴が出た）。

⑤浮遊物が多い海底では、ハレーションが
強くなった。

4 まとめ

以上のように、試用試験等を通じて、「メ
ハライドランプ」の性能の高さや計画時の課

光源 距離	太陽光	メタルハライドランプ	ハロゲンランプ
1 m			
2 m			
3 m			
4 m			

写真 8 色見本集

Photo 8 Color standard samples

あった小型化、絶縁・耐熱等の対策も有効であることが確認でき、試作段階の目的を達成した。併せて「メタルハライドランプ」を潜水機用水中照明灯の光源として、実用化するための目処も得ることができた。

今後、最も大きな課題は安定器の軽量化であるが、電子技術の飛躍的進歩をベースに近いうちに小型・軽量化が達成されることが期待でき、軽量化の改善も進めることが可能となるであろう。

最後に、今回の開発に当たり、陸上試験等の協力を頂いた運航部の無人探査機操縦班小原班員及び深海開発技術部の月岡研究員、海域試験時に準備等の協力を頂いた海上支援員・業務協力員以上の各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 志村明敏：「「しんかい2000」用 1 KW水中投光器の試作」．海洋科学技術センター試験研究報告第12号，P27～32，（1984）
- 2) 伊藤安雄：「知ってそうで知らない放電灯の話－2」．CHROMA 6月号（第5巻 第6号），P53～55
- 3) 関西造船協会：「造船設計便覧第4版」，P106

（原稿受理：1991年12月25日）