

短波長紫外線の測定法に関する  
研究調査委員会報告

2000年3月

社団法人 照 明 学 会

## 報告書目次

1. はじめに .....	1
2. 短波長紫外放射域の標準供給の現状	
2. 1 電総研における検出器校正	
2. 1. 1 はじめに .....	3
2. 1. 2 希ガス電離箱に基づく真空紫外検出器校正 .....	4
2. 1. 3 電力置換型絶対放射計に基づく検出器校正 .....	7
2. 1. 4 まとめ .....	10
2. 2 電総研における放射源校正	
2. 2. 1 はじめに .....	13
2. 2. 2 物理量の校正 .....	13
2. 2. 3 シンクロトロン放射の性質 .....	13
2. 2. 4 重水素ランプ .....	14
2. 2. 5 ビームラインの概要, 光源校正の方法 .....	14
2. 2. 6 シンクロトロン放射の放射束の絶対値, 不確かさ .....	15
2. 2. 7 ビームライン光学系の偏光特性, 光源校正 .....	16
2. 2. 8 おわりに .....	16
2. 3 日電検における分光放射照度標準のトレーサビリティ	
2. 3. 1 計量法トレーサビリティ制度について .....	17
2. 3. 2 分光放射照度標準のトレーサビリティ .....	17
2. 3. 3 電子技術総合研究所における分光放射照度標準の確立 .....	17
2. 3. 4 日本電気計器検定所における分光放射照度標準の供給 .....	18
2. 4 NIST における短波長標準の供給および研究	
2. 4. 1 概要 .....	21
2. 4. 2 放射源の標準 .....	21
2. 4. 3 検出器の標準 .....	23
3. 企業における短波長紫外放射測定の現状	
3. 1 誘電体バリア放電を利用した $Xe_2^*$ エキシマランプの光出力の測定	
3. 1. 1 誘電体バリア放電励起 $Xe_2^*$ エキシマランプ .....	26
3. 1. 2 測定方法 .....	26
3. 1. 3 測定結果 .....	27

3. 2	UV 領域における検出器の校正	
3. 2. 1	分光器を使用して分光応答度を測定する場合	29
3. 2. 2	光源の出力から検出器の感度を校正する場合	29
3. 3	UV-185 真空紫外照度計	
3. 3. 1	はじめに	32
3. 3. 2	UV-185 の特長	32
3. 3. 3	用途	32
3. 3. 4	UV-185 真空紫外線照度計概要	32
3. 3. 5	UV-185 真空紫外線照度計仕様	34
3. 4	日立製作所の紫外線ランプについて	
3. 4. 1	重水素ランプ (885-3570)	35
3. 4. 2	メタルハライドランプ (050-0280)	35
3. 5	ニッポ電機の紫外線ランプとその測定方法	
3. 5. 1	まえがき	37
3. 5. 2	紫外線ランプ	37
3. 5. 3	紫外線ランプの測定方法	38
3. 6	岩崎電気の紫外線ランプとその測定方法	
3. 6. 1	紫外線ランプ	40
3. 6. 2	紫外放射域の測定	44
3. 7	短波長紫外線の測定について	
3. 7. 1	はじめに	45
3. 7. 2	紫外線測定例	45
3. 7. 3	測光上の問題点	47
3. 8	紫外から真空紫外光検出用光センサとパワーメータへの応用	
3. 8. 1	序	48
3. 8. 2	光センサ	48
3. 8. 3	パワーメータへの応用	49
3. 8. 4	あとがき	51
3. 9	低圧水銀ランプを使用した紫外線照射装置の現場報告	
3. 9. 1	はじめに	52
3. 9. 2	185 nm 放射の応用市場	52
3. 9. 3	254 nm 放射と 185 nm 放射の測光	53
3. 9. 4	おわりに	54

3. 1 0	エキシマレーザーの光出力の測定	
3. 1 0. 1	エキシマレーザーの出射光の特徴	55
3. 1 0. 2	測定方法および測定機器	55
3. 1 0. 3	測定器の較正	56
3. 1 0. 4	結果と問題点のまとめ	57
3. 1 1	低圧水銀ランプの応用と課題	
3. 1 1. 1	UV/O <sub>3</sub> プロセスの特徴	58
3. 1 1. 2	UV/O <sub>3</sub> プロセスの応用例	59
3. 1 1. 3	課題	60
3. 1 1. 4	おわりに	60
3. 1 2	エキシマランプの実用状況と放射測定の実際	
3. 1 2. 1	エキシマランプの構造	61
3. 1 2. 2	エキシマランプを搭載した平面光源	61
3. 1 2. 3	エキシマランプの用途紹介	62
3. 1 2. 4	真空紫外エキシマ放射の測定	62
4.	埼玉大学における紫外・真空紫外領域での放射測定	
4. 1	概要	65
4. 2	大気中での短波長紫外放射測定	
4. 2. 1	波長 190~800 nm での放射検出器の分光応答度測定	65
4. 2. 2	波長 190 nm~400 nm での放射源の分光放射照度測定	66
4. 2. 3	低圧水銀放電 253.7 nm 放射の測定	68
4. 3	窒素雰囲気, 真空中での紫外放射測定	
4. 3. 1	測定環境の設定	69
4. 3. 2	波長 160~250 nm での受光器の分光応答度の測定	70
4. 3. 3	波長 160~250 nm での放射源の分光放射照度の測定	70
4. 3. 4	低圧水銀放電 185 nm 放射の測定	72
4. 4	真空紫外域での大気と窒素の吸収	73
5.	低圧水銀スペクトル線 185.0 nm および 253.7 nm の放射束の相互比較	
5. 1	はじめに	75
5. 2	放射源と測定系	75
5. 3	比較測定結果	78
5. 4	考察とまとめ	81
6.	おわりに	83

## 1. はじめに

光産業界は近年高い成長率で伸長し、今や国際的にわが国を支える基幹産業のひとつに成長しつつある。この中にあって短波長紫外放射（110 nm～300 nm）の利用は若く、その成長には著しいものがあり、さらなる発展が期待される領域である。具体的には光洗浄（光アッシング）、紫外線殺菌、光触媒、脱臭・分解、硬化、乾燥、表面改質、リソグラフィ、レーザアブレーション等、短波長紫外放射の産業応用は多岐にわたっており、使用される光源も水銀ランプ、キセノンランプ、エキシマランプに始まり、エキシマレーザ、YAGレーザ、Tiサファイアレーザ等多様である。

一方、当該波長領域での放射エネルギーの測定技術は高いとは言えず、統一した測定法の確立を模索している状態にある。また当波長領域の標準検出器、標準光源を開発している機関も、これらの標準がどのような測定条件の中でどのように使われるかを予想するのが困難である。

上記の状況のもとにおいて、高精度な短波長紫外線の標準的な測定法を見定めるために、平成8年度に「短波長紫外線の測定法に関する研究調査委員会」が設置された。当波長領域の紫外放射の利用と測定技術に関する現状と問題点、光源および検出器の進展、標準光源・検出器の国内外の開発状況およびトレーサビリティの現状を下記の委員の方々および別記の専門の方々の協力を賜わり調査研究を行ってきた。

平成11年度までの4年間に15回の会合を開き調査を行ってきた。できるだけ広範囲の分野をとりあげたいという方針と報告書の紙数との関係で個々の内容が限られざるを得なかったのは残念である。

終わりにあたり、多くの関係者のご努力により本報告書が完成されたことを記し、ここに感謝の意を表したい。

短波長紫外線の測定法に関する研究調査委員会（平成8年度～11年度）の委員は次の通り。

委員長	小貫英雄	電総研
幹事	松野博光	ウシオ電機(株)
	斉藤輝文	電総研
幹事補佐	大埜邦治	ウシオ電機(株)
	座間達也	電総研
委員	中川靖夫	埼玉大学
	平本立躬	ウシオ電機(株)
	干場芳洋	岩崎電気(株)

媚山義光	(株)オーク製作所
近藤久男	東芝ライテック(株)
戸沢 均	(株)トプコン
金森佳憲	日本電池(株)
久米英治	浜松ホトニクス(株)
中村 宏	フュージョンジャパン(株)
佐々木政子	東海大学
安田 誠	(株)日立製作所
古海 浩	ニッポ電機(株)
本間誠一	日電検

委員会で講演および報告書の執筆をお願いした上記委員以外の方々は次の通り。

第3回委員会	須山恵司	浜松ホトニクス(株)
第6回委員会	吉川和彦	東芝ライテック(株)
第8回委員会	石黒省三	セン特殊光源(株)
第9回委員会	細谷浩二	日本電池(株)
第9回委員会	菱沼宣是	ウシオ電機(株)

(電子技術総合研究所 小貫英雄)

## 2. 短波長紫外放射域の標準供給の現状

### 2. 1 電総研における検出器校正

#### 2. 1. 1 はじめに

時間的、空間的に隔てられた複数の測定を客観的に比較するためには、共通の不変かつ普遍的な標準となる尺度が必要なことは論を待たない。しかし紫外・真空紫外域においては、あらゆる物質の吸収が強くなるために、その実現には安定で感度むらの少ない検出器の実現の困難さをはじめとして、他の波長域に比べ多くの困難が伴っている。

分光応答度に関して電総研では現在、表1に示したように、10-90 nmおよび250-1150 nmの波長域で既に分光応答度標準を確立し、その中間で空白域となっている90-250 nmの波長域で開発を行っている。

本稿では、当該波長域において電総研で行われている検出器標準の開発の現況をその技術的背景等とともに述べる。

表1 電総研における分光応答度標準の開発状況

波長域[nm]	10-90	90-250	250-1150
現在の状況	依頼試験制度で供給	開発中	依頼試験制度で供給(トレーサビリティ制度での供給を準備中)
一次標準	希ガス電離箱	He3型極低温放射計	極低温放射計
不確かさ	最大9% (k=1)		最大1% (k=2)
備考	放射源:分光されたシンクロトロン放射	放射源:分光されたアンジュレータ放射	波長域拡張のためにサーモパイル使用

検出器標準の実現方法を大別すると以下のようなになる。

- 1) 他の波長域からの熱型検出器等による拡張
- 2) 一次標準放射源と透過率既知の分光素子を用いる方法
- 3) 一次標準検出器による方法

このうち紫外域検出器標準確立のために用いられる最も一般的な方法は、感度に波長依存性がない熱型検出器を用いて、一次標準検出器が存在する可視域等の波長域から拡張する1)の方法である。しかし、サーモパイル、焦電型検出器等の熱型検出器は感度が低いために、レーザ以外の放射源では一般に信号対雑音比が悪く、測定精度を高めるのは容易ではない。一般に、信号対雑音比を高めるためにはそれら検出器の受光面を小さくする必要があり、したがって、入射ビーム径も十分小さくしなければな

らない。さらにこの場合、分光器を用いている時には、波長走査をしてもその像点位置が変動することのないように、回折格子の分散面が正しく回転軸に対して直交するようにする精密に調整されていることが重要である。またこの場合、光子ビームの発散角が大きくなることにより、その応答が平行ビームに対する応答と異なる問題が生じ、これは特に紫外域で顕著となる<sup>1,2)</sup>ことに留意しておく必要がある。

熱型検出器の感度の低さによる上記困難さを克服する第一の手法は、熱型検出器として室温動作型に代え液体ヘリウム温度で動作する極低温放射計を用いる方法である。一般に物質の比熱は温度を下げることにより低下するので、同じ放射パワーによる受光部の温度上昇を大きくすることができ、信号対雑音比を改善するとともに応答を早くすることが可能となる。第二の手法は、放射源そのものの強度を増すことであり、分光パワーとして比較すると、分光したシンクロトロン放射より水素放電管の輝線スペクトルの方が強力であり、室温動作型の熱型検出器の使用が可能である。

しかし輝線スペクトルでは使用できる波長が限定される欠点があるので、電総研では、放射源としてシンクロトロン放射より強力かつピーク波長可変のアンジュレータ放射を使用する方法を採用して、現在 90-250nm 域の分光応答度標準確立を目指して開発を進めている。さらに熱型検出器には、300mK まで冷却可能なヘリウム 3 型の極低温放射計を採用し、十分高い信号対雑音比を確保することを企図している。

検出器校正時および使用時に配慮すべき事項には、以下のようなものがあり、これらを十分に検証しておくことが重要である。

- 1) 感度の安定性
- 2) 感度の直線性
- 3) 感度の均一性
- 4) 感度の温度特性
- 5) 測定光学系、検出器の偏光特性

当該紫外、真空紫外領域では、このうち特に 1)、3)、5) に問題があることが多いので、注意する必要がある。

## 2. 1. 2 希ガス電離箱に基づく真空紫外検出器校正<sup>3,4,5)</sup>

希ガスを電離気体とする電離箱は、その希ガスのイオン化ポテンシャルに等しい光子エネルギーから少なくともその 2 倍の光子エネルギーの範囲内で、吸収された 1 個の光子が必ず 1 組の電子-イオン対を生成するので、絶対検出器として使用することができる(基本的にこの原理は可視域で用いられるシリコン・フォトダイオードの自己校正法の原理と同様である)。

図1に電総研で開発したシンクロトロン放射を放射源とする希ガス電離箱に基づく検出器校正システムを示す。波長域に応じて動作気体を He, Ne, Ar, Kr, Xe と変えることにより、本システムでは、10-92 nm の波長領域をカバーしている。

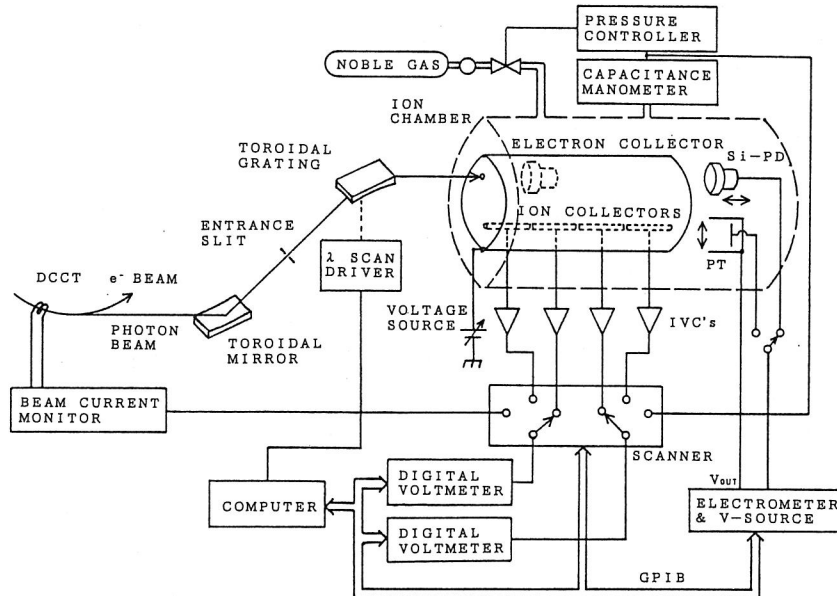


図1 希ガス電離箱に基づく検出器校正システムの概略図。DCCT: 蓄積電流測定用直流トランス、IVC: 電流-電圧変換器、Si-PD: Si フォトダイオード、PT: 光電管。

当該波長域では、Al, In, Sn 等の限られた透過帯域を持つ金属薄膜フィルターは存在するものの、透明な窓材が存在しない。上記のフィルターを使用した場合、透過率が低い上に、使用できる帯域が狭いので、本システムでは、電離箱入射部に多孔ガラス細管を用いて差動排気を施すことにより、完全に窓のない光学系を実現している。電離箱は4段のイオン収集電極を持ち、いわゆる端効果を取り除くとともに、ガスの吸収係数を自動算出する仕組みによって入射光子ビームを全吸収させなくとも電離箱入射端における光子束を知ることができる。電子収集電極はイオン収集電極を取り囲む大きな円筒の形状で、イオン収集電極の軸から偏心させた配置にしてある。このような電極配置によって、光電子がイオン収集電極に飛び込むことのない電圧の条件を満たしつつ、二次電離を可能な限り抑制させるために光子ビーム位置における電界を小さくすることができる。

校正すべき検出器は電離箱の下流側に配置されており、電離箱の動作気体を排気することにより、同じ光子束を受けることにより校正が可能となる。ただし、光子ビームは末広がりとなっているので、具体的には以下のような手順を採用している。すなわち、直径 10 mmφ の受光面を持つシリコン・フォトダイオード (XUV-100) のみをビーム広がり充分小さい前方の電離箱内で受光できるように、直線導入機構 (光軸と垂直な方向の位置の微調をするための tilt 機構も付属) によって光軸方向に移動できる構造とし、電離箱によってこのシリコン・フォトダイオードを校正した後は、これと未知の感度を持つ検出器との比較により校正する方式とした。そのため電離箱の直後、検出器の手前の位置に直径が 3 mmφ の開口を持つ板を直線導入機構 (tilt

機構付属) によって光路中に挿入できるようになっている。この開口を通過する約 3 mm φ のビームを用いることにより、シリコン・フォトダイオードから他の任意の検出器に値を移すことができる。シリコン・フォトダイオード以外の検出器は光軸と垂直な方向に移動するようになっている。

典型的な検出器の校正例を図2に、校正の不確かさは表2に示した。

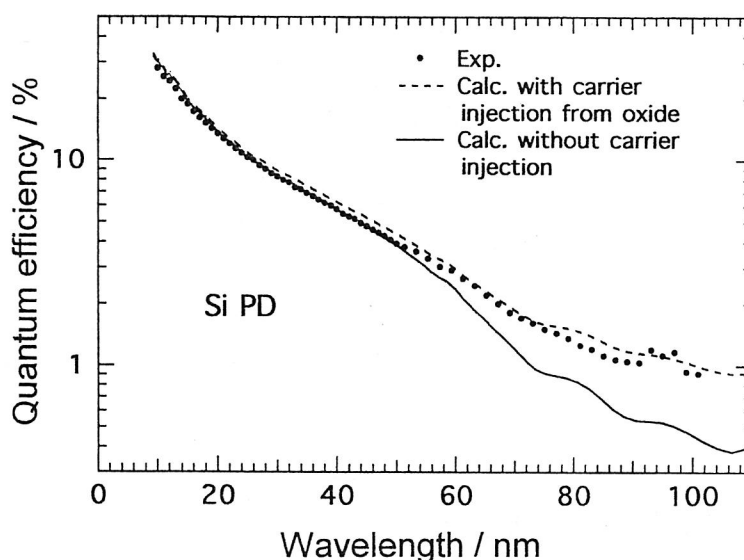


図2 Si フォトダイオード (UDT XUV-100) の校正結果 (黒丸)。実線は純光学的なモデルによる計算値、破線は表面酸化膜からのキャリア注入を仮定したモデルによる計算値。

表2 希ガス電離箱に基づく検出器校正の  $1\sigma$  不確かさ。括弧内の数字は 2 乗和の平方根による小計。

Sources of error	$1\sigma$ uncertainties/%			
	15 nm	30 nm	50 nm	90 nm
<i>Determination of photon flux</i>	(7,9)	(2,8)	(2,2)	(2,0)
Fluctuations in ion currents	3	2	2	2
Secondary ionization correction	7	2	0	0
Multiple ionization correction	2	0	0	0
Impurity radiation correction	0,3	0	1	2
<i>Photocurrent of the Si photodiode</i>	(2,1)	(2,2)	(2,9)	(5,4)
Fluctuations in photocurrent	2	2	2	2
Impurity radiation correction	0,2	0	2	3
Nonuniformity	0,5	1	2	4
<i>Instability of photon flux divided by beam current</i>	4	4	4	4
Sum in quadrature	9,1	5,4	5,7	6,8

### 2. 1. 3 電力置換型絶対放射計に基づく検出器校正

電力置換型絶対放射計は熱型検出器の一種で、入射放射がもたらすのと同じ温度上昇を内臓のヒーターに加える電力で置換することによって、入射放射のパワーを知るものである。図3にその動作原理を示す<sup>6)</sup>。

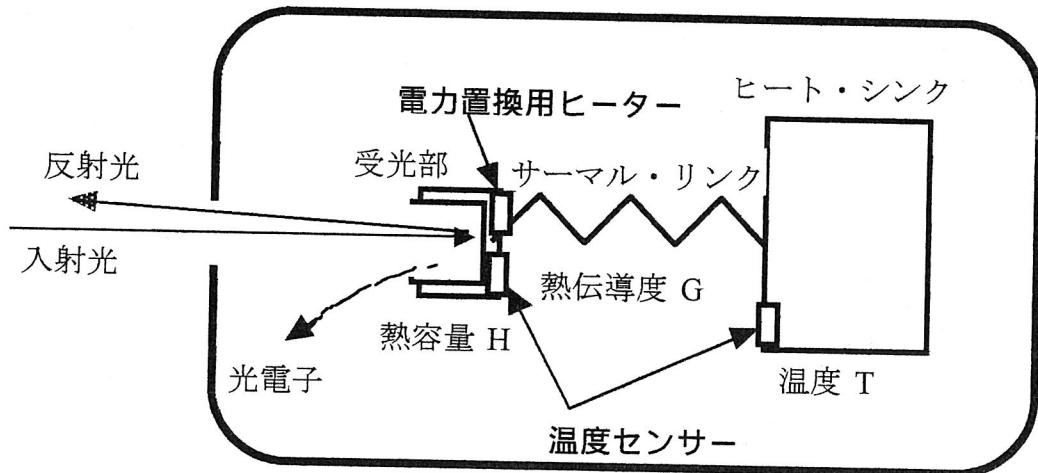


図3 熱型検出器の概念図

入射放射パワー  $P_p$  は、 $\eta$  の吸収率を持つ受光部で  $\eta P_p$  のパワーの熱に変換され、温度上昇  $\Delta T_p$  をもたらすとする。次に入射放射を遮光して、受光部のヒーターに電力  $P_e$  を加え、温度上昇  $\Delta T_e$  を発生させる。 $\Delta T_p = \Delta T_e$  となるように  $P_e$  を調節することにより、入射放射パワー  $P_p$  は以下の通り決定される。

$$P_p = P_e / \eta$$

$P_p$  の決定にともなう誤差要因には以下のようなものがある。

- ・入射光の吸収率（反射率）評価
- ・光電子放出、蛍光による損失
- ・光加熱とヒーター加熱の等価性の問題

電力置換型放射計の感度（単位パワー当たりの温度変化）は、図3中サーマルリンクのコンダクタンス  $G$  の逆数に比例し、時定数  $\tau$  は、光吸収部の熱量を  $H$  とすると次式で与えられる。

$$\tau = H/G$$

#### 2. 1. 3. 1 200 nm 以上の波長域における室温動作放射計による検証実験<sup>7)</sup>

図4に本測定的光学系を示した。放射源は電総研の電子蓄積リング NIJI-II に設置された 15 周期の偏光可変の小貫型アンジュレータ<sup>8)</sup>である。アンジュレータ放射は Al 平面ミラーで反射された後、シリカガラスの窓を透過し、校正実験は大気中で行

われた。アンジュレータ放射は準単色であるので当初、その放射を分光することなく校正に用いることも試みたが、分光応答度が波長の関数で大きく変化している場合には、不確かさを十分小さくすることができない問題が明らかとなったので、干渉フィルタを用いる方式とした。本測定に用いた干渉フィルタのピーク波長と半値幅は表3に示したとおりである。

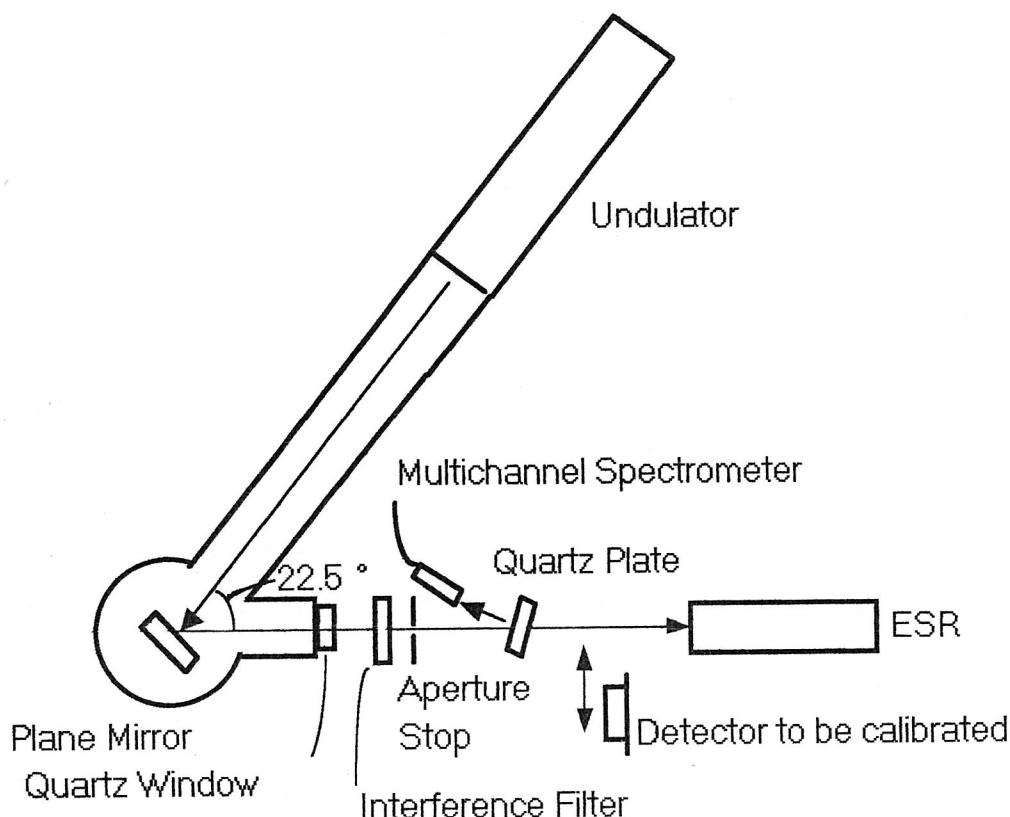


図4 アンジュレータ放射を用いた検出器校正のための光学系の概略

表3 使用した干渉フィルタのピーク波長と半値幅

波長 [nm]	202	209	220	238	254	280	303	323	362	401
半値幅 [nm]	20	13	10	13	10	10	20	12	17	16

一次標準検出器として、室温動作型の電力置換型絶対放射計を用いた。本電力置換型絶対放射計は完全な対称性を持つ2つ吸収空洞(一つはダミー)からなっており、それぞれに置換用のヒータを内臓し、零位法によって入射放射のパワーを最小分解能は $0.1\mu\text{W}$ で決定できる性能を有する。受光面は直径6 mmφである。

本手法により Si, GaP フォトダイオード及び CsTe 光電管を校正した結果を、既存の検出器標準 (250 nm 以上) に基づく校正値とともに、図5に示した。その時の Si フォトダイオードの校正の際の不確かさ ( $1\sigma$ ) を表4に示した。

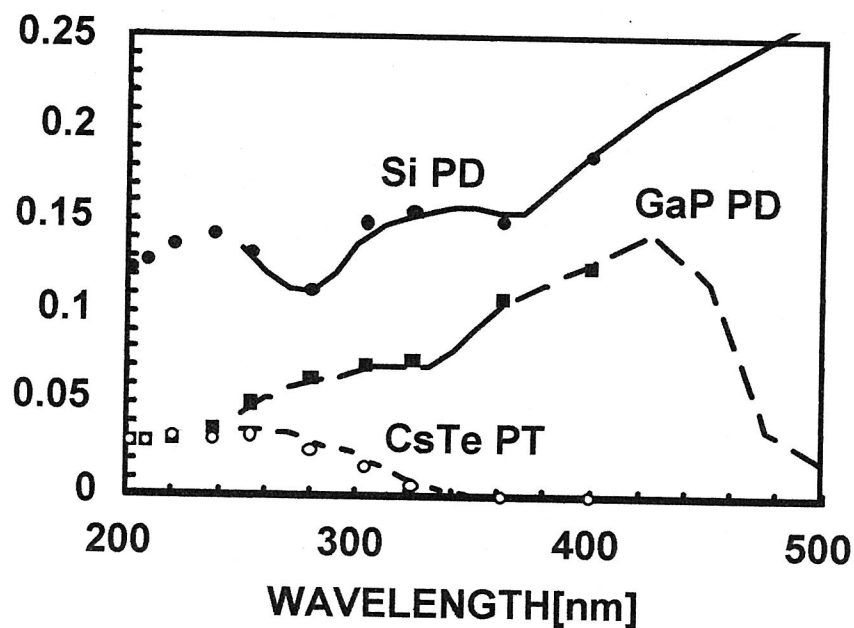


図5 分光されたアンジュレータ放射を用いた電力置換型検出器に基づく Si, GaP フォトダイオード及び CsTe 光電管の校正結果。各線は既存の電総研分光応答度標準に基づく校正結果。

表4 干渉フィルタで分光されたアンジュレータ放射を用いた電力置換型検出器に基づく Si フォトダイオード校正時の不確かさ

Sources of uncertainty ( $1\sigma$ )	Uncertainty in ESR	Uncertainty (%) in Si photodiode	Combined uncertainty (%)
Absolute value	0.5	-	0.5
Signal to noise ratio	3	0.6	3.1
Bandwidth effect & stray light	0	3	3
Non-uniformity	0.05	1.4	1.4
Alignment	2	0	2
Sum in quadrature	3.6	3.4	5.0

### 2. 1. 3. 2 真空紫外を含む波長域における現在遂行中の計画

上記 200 nm 以上の波長域における検証実験により、分光ビームの単色性の向上、電力置換型検出器の感度向上等改善を図ることにより、200 nm 以下の波長域においても適用できる見通しが得られたので、以下の方式により空白域となっている 90-250 nm の波長域の分光応答度標準の確立を目指して現在研究を進めている。分光素子としては、検証実験では干渉フィルターを用いたが、単色性が不十分なことによる不確かさが無視できないことから、今度は瀬谷・波岡型分光器を用いることとした。また電力置換型検出器としては、0.3K まで冷却可能な He3 冷凍器型極低温電力置換型絶対放射計を採用することにし、目標分解能 0.1nW を目指している。

室温動作の放射計に比較して極低温放射計のメリットには以下のようなものがある。

- ・比熱が温度の減少とともに急激に減少するので、応答の時定数を小さくすることができ、従ってサーマルリンクの熱伝導度  $G$  を小にすることが可能となり、感度を大きくすることができる。
- ・受光部の熱伝導度が温度の減少とともに急激に増大するので、光パワーと電力の等価性を向上させることができる。
- ・輻射熱損失が無視し得るので、 $G$  を小にすることが可能となり、これも感度増大に寄与する。
- ・計測系の熱雑音減少するので、信号対雑音比を向上させることができる。

### 2. 1. 4 まとめ

希ガスのイオン化効率が 1 であることを利用した希ガス電離箱に基づく真空紫外検出器校正について、本装置の特徴ならびに本研究で得られた要点は以下の通りである。

- 1) 電離箱の入射部には一切の窓材を用いずに多孔ガラス細管を採用することによって、非常に効果的な差動排気特性と、波長領域の全域にわたる光子に対する高い透過性を両立できた。その結果として信号対雑音比が大きくなり、また Al 薄膜を窓に用いた場合には波長が長くなるにつれて高次光の混入比が大きくなる欠点を著しく緩和することができた。
- 2) イオン集電極を 4 段にしていわゆる端効果の評価を可能にした。
- 3) 第 2 段と第 3 段のイオン電流のみを用いて得られたガスの減弱係数は透過測定で求められた減弱係数と 3% の測定精度内で一致した。
- 4) 二次電離を生じにくくするために、電子の走行距離を短くし、かつその部分での電界が小さくなるように偏心した二重円筒の電極構造を採用した。
- 5) プラトー領域における傾斜は各段とも 100 V あたり 3% 以下と良好であった。

6) Ne 電離箱の場合 32 nm 以下から不純物によるペニング電離が始まりさらに波長が短くなると二次電離が生じていることがわかった。ペニング電離が約 0.005 Torr 以上のガス圧で無視できない寄与を生じることを示した。しかし 0.005 Torr より低いガス圧ではその寄与は無視でき、光子束を正しく求めることができる。

7) ペニング電離、二次電離ともほぼ同様のガス圧依存性を持つので、それらの効果に対する補正係数は、イオン電流のガス圧依存性の実測値を、吸収係数を既知の値として与えた時に得られる計算値で割ることにより決定した。

8) 多重電離の効果については文献値を用いて補正を加えた。

9) 電離箱のガスには 10~45 nm の波長範囲では Ne を約 0.15 Torr、46~60 nm の波長範囲では Ar を約 0.1 Torr、それより長い波長範囲では Xe を約 0.1 Torr 用いて測定を行い、蓄積電流で規格化した光子束を 15, 30, 50, 90 nm の各波長でそれぞれ約  $\pm 8\%$ ,  $\pm 3\%$ ,  $\pm 2\%$ ,  $\pm 2\%$  の不確かさ ( $1\sigma$ ) で決定することができた。

次に、電力置換型絶対放射計に基づく検出器校正に関して、200nm 以上の波長域で行った検証実験で得られた結論等は以下の通りである。

1 0) 約 10 nm の帯域幅の干渉フィルタで分光して 0.1 mW/mA (蓄積リング電流 1mA 当たり) 前後のパワーが得られた。

1 1) 上記パワーはシンクロトロン放射の場合に比べたらかなり強力であるが、不確かさを向上させるためには、電力置換型絶対放射計の感度を向上する必要が認められた。

1 1) Si, GaP フォトダイオード及び CsTe 光電管を校正した。

1 2) 校正結果は既存の検出器標準 (250 nm 以上) と不確かさ ( $1\sigma$ ) の範囲内で一致した。

1 3) 200-400 nm の波長域において、既存の光源では実現困難な平行性の良い光子ビームを用いて、検出器校正を行うことができた。

1 4) 干渉フィルタが有限な半値幅を持つことによる不確かさ ( $1\sigma$ ) が 2%あり、これを少なくするためには、干渉フィルタに代えて分光器を使用する必要が認められた。

1 4) この方法は 200nm 以下の真空紫外域にも適用可能であり、超高真空ビームラインに加えて、電力置換型絶対放射計の極低温化ならびに干渉フィルタに代えて真空分光器を採用する方式により、現在紫外・真空紫外域における分光応答度標準の開発を推進している。

(電子技術総合研究所 斎藤輝文)

---

## 参考文献

- 1) T. Saito, L. R. Hughey, J. E. Proctor and T. R. O' Brian, "Polarization characteristics of silicon photodiodes and their dependence on oxide

- 
- thickness" , Rev. Sci. Instrum. 67, 1-3 (1996) (Special Issue in CDROM).
- <sup>2)</sup> T. Saito and H. Onuki, " Difference in detector response between a collimated beam and a beam with angle-divergence" , to be published in Metrologia (2000).
- <sup>3)</sup> T. Saito and H. Onuki, "Detector calibration in the 10-60 nm spectral range at the Electrotechnical Laboratory" , J. Optics **24**, 23-30 (1993).
- <sup>4)</sup> T. Saito and H. Onuki, "Detector calibration in the wavelength region 10 nm to 100 nm based on a windowless rare gas ionization chamber" , Metrologia **32**, 525-529 (1995/96).
- <sup>5)</sup> T. Saito, "A study on establishment of VUV detector standards" , Researches of the Electrotechnical Laboratory No. 960 (Electrotechnical Laboratory, Tsukuba, 1994) in Japanese.
- <sup>6)</sup> For example : R. U. Datla, K. Stock, A. C. Parr, C. C. Hoyt, P. J. Miller and P. V. Fouka, "Characterization of an absolute cryogenic radiometer as a standard detector for radiant-power measurements" , Appl. Opt. **31**, 7219-7225 (1992).
- <sup>7)</sup> T. Saito and H. Onuki, "UV detector calibration based on ESR using undulator radiation" J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena **80**, 397-400 (1996).
- <sup>8)</sup> H. Onuki, K. Yagi, K. Awazu, T. Yamada, T. Saito, "Progress report on recent researches with polarizing undulator" , SPIE **2873**, 90-95 (1996).

## 2.2 電総研における放射源校正

### 2.2.1. はじめに

従来、可視、近紫外領域では、黒体放射、シリコンフォトダイオードの自己校正方、もしくは、極低温放射計を用いた手法等により、放射束、放射強度 (W/sr)、放射照度 (W/m<sup>2</sup>)、放射輝度 (W/m<sup>2</sup>sr)、分光応答度、等、放射に関わる諸量の、放射源校正・標準確立がなされてきた。

しかし、短波長紫外領域、及び真空紫外領域の放射源校正については、その放射自体の扱いが困難であると共に、適当な光源、検出器が乏しく、技術確立の障害となっている。諸外国の一部では、標準確立、供給がなされているが、相互比較の結果は芳しくない。そのため、短波長紫外領域、及び真空紫外領域の放射源校正に関しては、未知要因解決に向けた研究の必要性が認識されている。

以下では、電総研での短波長・真空紫外領域 (160~310nm) における放射源校正の研究を概説する。

### 2.2.2. 物理量の校正

物理量校正には、基準・標準が必要となる。過去にはメートル原器等「物」で標準が実現されていた。しかし、再現性が良好で、小数のパラメータで制御可能な基本的物理現象を利用すると、不確かさの少ない標準が出来る事が認識されるようになり、現在、殆どの標準確立・物理量校正がこの手法に移行している。校正には標準量を出力する標準源、又は、物理量の絶対値を計測可能な標準検出器を用いる。通常、これらの標準源、標準検出器 (以後まとめて標準器と呼ぶ) の取り扱いは細心の注意を要し、搬送には適さない為、一般ユーザーには、標準器により校正された二次標準が供給される。

放射束に関係する標準の場合、標準器は、標準光源と標準検出器の2種類である。前者は、物理法則により絶対放射束が計算可能であり、後者は、物理法則を基に入射放射束の絶対値が測定可能である。標準検出器による光源、又は、標準光源による検出器、の校正は、理論的には可能であるが、両者間に何らの介在物 (光学系等) が存在しない、もしくは介在物の特性が十分な精度で解っている場合のみ有効で、分光器、ミラー等必要となる殆どの場合、光源間、又は、検出器間で値が移される。つまり、実用上は標準光源、及び、標準検出器の2種類が必要とされる。

代表的な標準光源として、プランクの放射式より分光放射束が計算される黒体放射があるが、短波長紫外線領域、真空紫外線領域では放射束が小さく、不確かさが大きい。この領域では、精密にパラメータを制御したプラズマ放射も利用されているが、素過程の複雑さ等により標準光源としての利用には疑問が残り、有望なものとしてはシンクロトロン放射があるのみである。二次標準として有望な光源も少なく、重水素ランプのプラズマ放射を光源として用いることが多い。

本研究では一次標準として電子技術総合研究所の電子蓄積リング TERAS (750MeV) からのシンクロトロン放射を、二次標準として重水素ランプからの放射を用いている。

### 2.2.3 シンクロトロン放射の性質

シンクロトロン放射の放射束は理論的に計算可能であり、以下のような式で表される<sup>1)</sup>。

( $\Phi$  : シンクロトロン放射束 [W]、 $\Phi_{\perp}$  : 軌道面に垂直な電場ベクトルを持つ放射束、 $\Phi_{\parallel}$  : 軌道面に水平な電場ベクトルを持つ放射束、 $E$  : 電子エネルギー、 $m_0$  : 電子質量、 $e$  : 素電荷、 $I$  : ビーム電流、

$$\begin{aligned} \frac{d^2\Phi}{d\theta d\psi} &= \frac{d^2\Phi_{\parallel}}{d\theta d\psi} + \frac{d^2\Phi_{\perp}}{d\theta d\psi} \\ &= \frac{eIR^2}{3\pi\epsilon_0\gamma^4\lambda^3} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \left\{ \left(1 + (\gamma\psi)^2\right)^{\frac{3}{2}} K_{2/3}^2(\xi) + \left(1 + (\gamma\psi)^2\right) (\gamma\psi)^2 K_{1/3}^2(\xi) \right\} \quad (1) \\ \gamma &= \frac{E}{m_0c^2}, \quad \xi = \frac{\lambda}{2\lambda_c} \left\{ 1 + (\gamma\psi)^2 \right\}^{3/2}, \quad R = \frac{E}{ecB}, \quad \lambda_c = \frac{4\pi R}{3\gamma^3} \end{aligned}$$

$c$  : 光速、 $B$  : 偏向磁場の値、 $R$  : 電子の回転半径、 $\lambda$  : 波長、 $K$  : 第二種ベッセル関数、 $\Psi$  : 軌道面から鉛直方向の角度、 $\theta$  : 水平方向の角度) シンクロトロン放射は、放射が軌道面方向に強く偏光しており、偏光成分の大きさは、軌道面から鉛直方向の角度 $\Psi$ によって変化する。

図1に、 $\Phi_{\perp}$ 、 $\Phi_{\parallel}$ の $\Psi$ 方向分布の概略と、電総研の電子蓄積リング TERAS の電子エネルギー750MeV の場合の放射束を示す。軌道面より離れるにつれて、 $\Phi_{\perp}$ の成分が増加し、 $\Phi_{\parallel}$ は減少する、また、放射は短波長側ほど狭い角度に集中することが分かる。

可視域の標準を用いて、シンクロトロン放射束の絶対測定が行われ、標準性が確認された ((1) 式

と測定誤差の範囲内で一致)。以後、従来の黒体放射等の標準器では不可能な、短波長・真空紫外、X線領域の一次標準光源として、シンクロトロン放射の使用が試みられるようになった<sup>2)</sup>。

## 2.2.4 重水素ランプ

重水素ランプは、重水素プラズマの発光を利用し、紫外・真空紫外域に連続スペクトルを放射する。

160nm以上の波長では、スペクトルは滑らかで輝線成分が見られず、輝線光源と比べると、校正時の波長誤差の影響が小さく、扱いの簡便さ、価格等の点で優れている。図2にランプ放射束の経時変化を示す。

放射束は100時間程度で安定し、その後の経時変化は0.03% [h<sup>-1</sup>]以下となる。初期の強度減衰の半分以上は窓材であるガラスの透過率減少に起因する<sup>3),4)</sup>。真空紫外光を利用する場合、真空中に光を入射する必要があるが、ランプ全体を真空中に入れての動作は、温度上昇、温度の不均一を招き、ランプ放射束の不安定の原因となる。本研究では、光取り出し窓が突出したランプを用い、突出部をOリングによりシールすることで真空中に光を入射している。

## 2.2.5 ビームラインの概要、光源校正の方法<sup>5)</sup>

図3に紫外・真空紫外光源校正用ビームラインの光学系の概要を示す。放射線防護用の壁の関係で、校正光学系は電子蓄積リングより7m離れた実験室内に設置されている。蓄積リングのビームラインの真空度を保つため、ビームラインは最低でも10<sup>-8</sup> [Torr]に保たれており、障害物なしでシンクロトロン放射を光学系に導入出来る。光源校正の方法は以下の通りである。

(1) 凹面ミラー1を光軸上に配置し、反射された重水素ランプ(D<sub>2</sub>lamp1)光の放射束を、(1)式により放射束を計算したシンクロトロン放射光により校正する(凹面ミラー2は、分光器スリット前面にシンクロトロン放射の発光点を結像させる。分光器位置は図中の実線。凹面ミラー1は、ランプ発光点のミラーによる虚像が、シンクロトロン放射の発光点位置に来るように調整されている)。共通光学系の為、分光後の検出器信号の比較により、ミラー1+D<sub>2</sub>Lamp1の系の放射束を校正する事が出来る。

(2) D<sub>2</sub>Lamp2をミラー1近くの光軸上に設置し、校正済みのミラー1+D<sub>2</sub>Lamp1との比較により、D<sub>2</sub>Lamp2を校正する(分光器入射スリット上に、D<sub>2</sub>Lamp2の発光点が結像されるよう、分光器は後方に移動[図中点線]。ミラー1+D<sub>2</sub>Lamp1の虚像がD<sub>2</sub>Lamp2の位置に一致するようにD<sub>2</sub>Lamp1を移動)。

結像系を利用しているため、(ミラーによる光源の取り込み立体角×光源の面積)と(ミラーによる反射光の絞り込み立体角×像の面積)は等しく、分光器入射スリット上の像と光源の輝度(W/m<sup>2</sup>sr)は比例する。よって、重水素ランプの分光放射束、もしくは、分光放射輝度の校正が出来る。

重水素ランプをシンクロトロン放射と同じ位置に設置すれば、校正は簡略化されるが、重水素ランプは、シンクロトロン放射と比べ、放射束が非常に小さいため、光学系に近付ける事が必要となる。

上記では、共通光学系によりミラーの反射率、分光器の分光効率の影響をキャンセルすることを試みている。しかし、重水素ランプとシンクロトロン放射の偏光特性は異なり(重水素ランプの偏光は自然偏光に近く、シンクロトロン放射は軌道面方向に偏光している:図1参照)完全にはキャンセル出来ない。これに対し、後述図5のPolarimeterを用いて偏光の影響を実測し、校正を行っている。

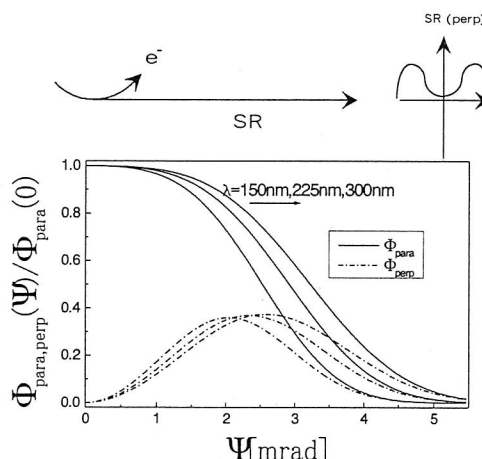


図1 Φ<sub>⊥</sub>、Φ<sub>∥</sub>のΨ方向分布

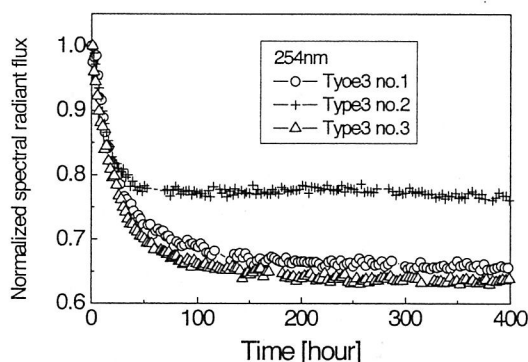


図2 重水素ランプ放射束の経時変化

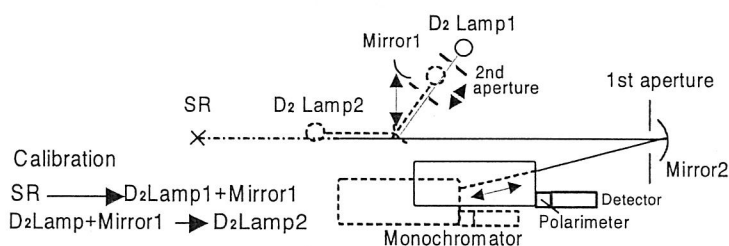


図3 ビームラインの光学系概要

### 2.2.6 シンクロトロン放射の放射束の絶対値、不確かさ<sup>5)</sup>

(1) 式よりシンクロトロン放射の放射束を計算するには、偏向電磁石の磁束密度B、放射取り込み立体角 $d\theta d\psi$ 、電子エネルギーE、蓄積電流Iが必要になる。以下では、これらの値の測定結果と、不確かさについて述べる。

電子の軌道面上での磁束密度を測定した結果を、図4 (a), (b)に示す。測定はNMR 磁場測定プローブ (プロトン試料使用：測定誤差 $\pm 1\mu\text{T}$ ) で行った。プローブを真空封止する事により、蓄積リングの真空を保ったままで、電子軌道上に挿入が可能である (封止用ステンレス管の残留磁場等による誤差磁場は $0.01\text{mT}$ 以下)。偏向電磁石の磁束密度の安定には、4時間程度を要し、ばらつきは $0.0037\%$ 以下であった。これにより生じるシンクロトロン放射束の不確かさ計算すると、 $0.003\%$ 以下となる。

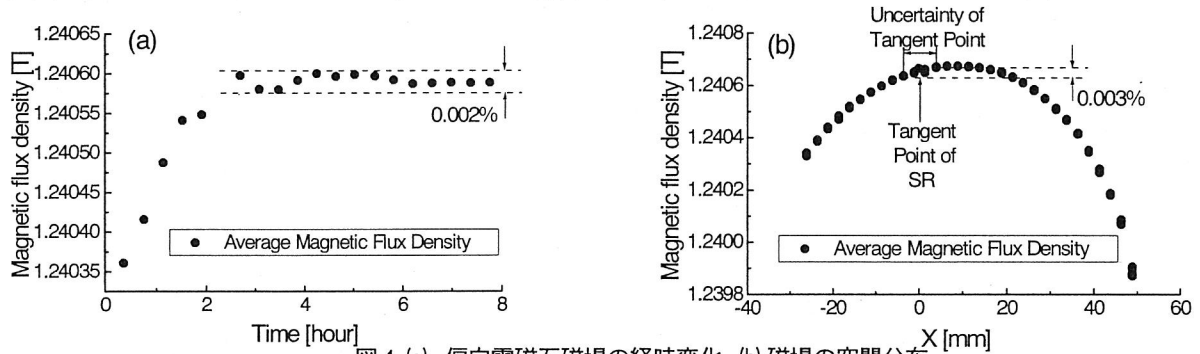


図4 (a) 偏向電磁石磁場の経時変化 (b) 磁場の空間分布

放射取り込み立体角は図3の1st apertureの大きさと、シンクロトロン放射までの距離で決定される。距離測定には図5の装置を用いた。可動スリットの影を、CCDカメラで測定し、距離Xを測定する。

上記の測定で得られた結果を図6に示す、横軸は可動スリット位置、縦軸はスリットの影の位置である。解析結果は原点を通る直線に一致し、シンクロトロン放射から1st Apertureまでの距離が

$11725\text{ [mm]}$ と算出された。距離導出の不確かさは、主に、CCD信号解析時の影位置の導出誤差に起因し $0.1\%$ 以下である。これによる放射束の不確かさも同じく $0.1\%$ である。

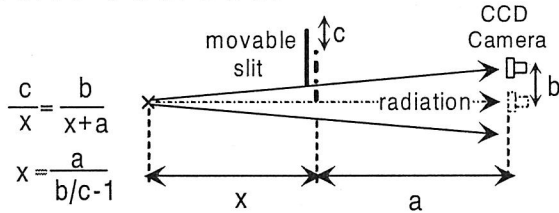


図5 距離測定の概要

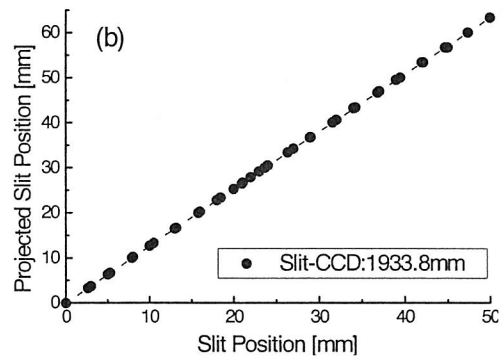


図6 スリット位置と影の位置の関係

図1より分かる通り、シンクロトロン放射の放射束分布は軌道面に対し一様ではなく、放射束計算の為には、軌道面と光学系の相対位置を決定する必要がある。また、電子ビーム断面は無窮小ではなく、ビーム内の各電子はわずかに異なる軌道面を描くため、これも加味しなければならない。

軌道面に垂直な電場成分を持つ放射は、軌道面で $0$ となる性質を利用し、軌道面を決定した。 $323\text{nm}$ のバンドパスフィルターと偏光子を組み合わせ測定した結果を図7に示す。この測定により、電子ビーム全体の平均的な軌道面は $7.1 \times 10^{-2}\text{mrad}$ の不確かさで決定可能で、これによる放射束の不確かさは $0.01\%$ 以下である事が確認された。また、電子ビームの太さを、CCDカメラにより測定し、半値幅 $1.4\text{mm}$ 、放射束に及ぼす不確かさ $0.05\%$ を得た。

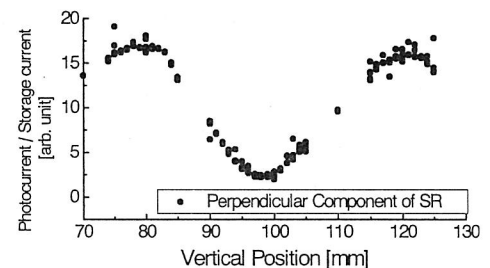


図7 軌道面の測定結果

電子エネルギーは、電子ビームにレーザー光を正面衝突させることで生ずる逆コンプトン $\gamma$ 線のエネルギー測定で決定され、電流値は、DCCTと呼ばれる特殊なパルストランスで測定された。これらによる放射束の不確かさは $0.25\%, 0.2\%$ である。以上の要因全てによるシンクロトロン放射の放射束の不確かさは $0.34\%$ で、不確かさの主原因は、距離、エネルギー、電流値測定に起因する不確かさである。

### 2.2.7 ビームライン光学系の偏光特性、光源校正

光学素子は反射型、透過型いずれも直入射でない限りは、偏光方向の異なる光に対し、反射・透過率が異なる為、本校正の様に比較光源間の偏光特性が異なる場合、校正装置が同一光学系でも、光学系の偏光特性を評価する必要がある。短波長紫外、真空紫外領域では、光学系の偏光特性決定に用いられる偏光子、位相子等に理想的な物が存在しないため、図8に示すような Polarimeter を、図1の位置に設置し、校正光学系通過後の偏光特性の評価を行った。互いに直交する偏光間には反射により位相差が生じ、またそれぞれの反射率は異なる（つまり一方の偏光成分が多く反射される）。Mirror Set は、4回反射により、1方向の偏光成分を選択的に多く通過させる不完全偏光子と不完全位相子の役割を果たしている。Mirror Set の偏光効率、位相差が未知であっても、2つの Mirror Set を組み合わせ、独立に回転させ、回転角度に対する光強度を測り未知数を決定することで、反射効率、位相差、入射光の偏光度を決定出来る。図8に Mirror Set の構成及び Polarimeter の測定例を示す。光源はシンクロトロン放射で、測定結果と未知数決定後のフィッティングは良く一致している。

シンクロトロン放射の偏光成分は(1)式により計算可能であり、校正用光学系を通った後の偏光成分は Polarimeter 測定により評価できる。入射光と出射光の偏光成分を比較することにより、校正用ビームラインの光学系の偏光特性を求めることが出来る。

図9に、校正用ビームラインの偏光特性、及び試験的に行ったランプの校正結果を示す。

上図に、異なる電場ベクトルを持つ入射光（校正光学系の入射平面に平行な方向を添字P、垂直な方向を添字Sで表している）に対しての、校正光学系の反射率（T）の比（ $T_s/T_p$ ）を示す。比の計算をするに当たり、光学素子すべてを反射型と仮定している。直入射に近い光学系を組み立てたが、光学系の偏光特性は無視できず、異なる偏光に対しては、光学系の反射率が異なる事が分かる。

下図に、上記結果を用いて試験的に行ったランプの校正結果を示す。校正光学系に結像系を用いているため、校正量は分光放射輝度（又は放射束）に限られる。重水素ランプは無偏光と仮定し計算した。但し、現在の装置、セッティングでは、検出器の暗電流の不確かさ（図8の縦軸の不確かさ）の為、偏光特性の解析誤差が大きく、校正結果は±10%以上の誤差を含んでいる。

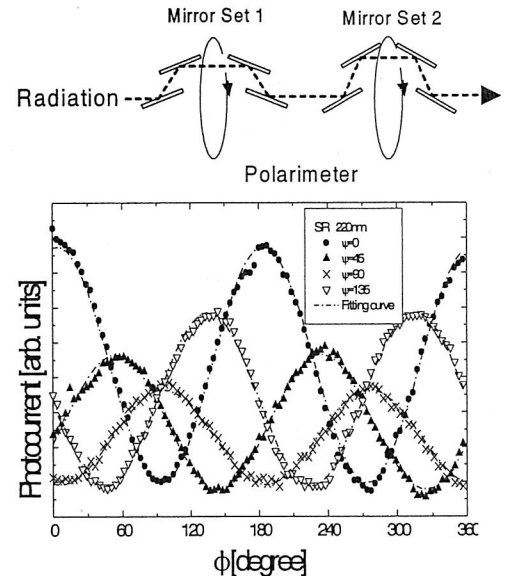


図8 Mirror Set の構成及び Polarimeter の測定例

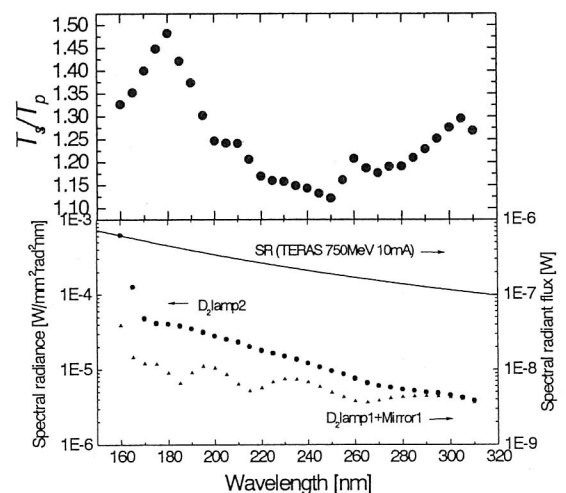


図13 光学系評価、及び試験的に行った校正結果

### 2.2.8 終わりに

以上、放射源校正について概説した。現状は研究開発、試験段階であり、特に校正手順の問題が大きい為（現手法は光学装置の移動、大気開放等、再現性の障害となる要因が多い）、光学系全体の改造に着手している。上記以外に、真空紫外光特有の炭素系ガスの光分解による光学素子の汚れ、シンクロトロン放射、重水素ランプの長期安定性等が未解決問題として存在し、解決に向け研究中である。

### 参考文献

- [1] J. Schwinger. Phys. Rev., 75 (1949) 1912.
- [2] N. P. Fox et al., Appl Opt., 25 (1986) 2409
- [3] T. Zama et al., J. Ele. Spec., Rela. Phenom., 80 (1996) 493
- [4] 座間達也 小貫英雄, 分光研究, 47 (1998) 129
- [5] T. Zama, et al., J. Synchrotron Radiation, 5 (1998) 759.

(座間達也、電子技術総合研究所)

## 2.3 日電検における分光放射照度標準のトレーサビリティ

### 2.3.1 計量法トレーサビリティ制度について

平成4年5月20日に計量法が改正され、計量標準供給制度（計量法トレーサビリティ制度）が平成5年11月1日から施行された。

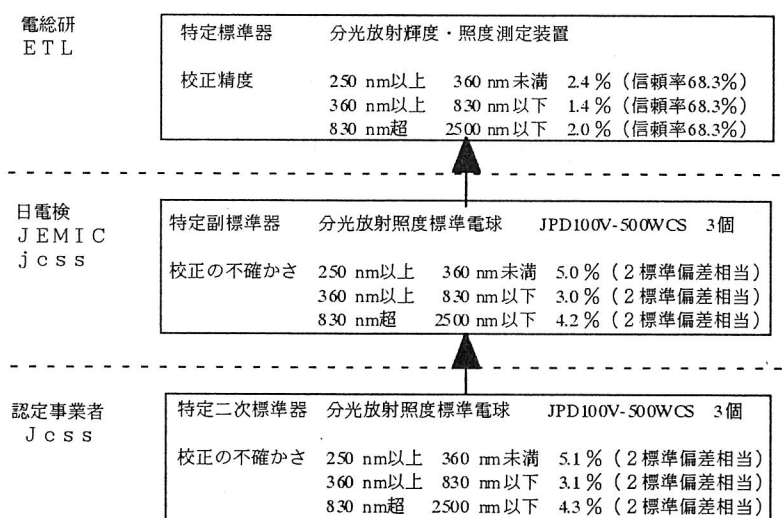
新計量法第8章では、一定の校正能力を持った校正実施機関を通商産業大臣が指定・認定し、それらの機関が行った計量器の校正結果を標章（jcss又はJcss）付の校正証明書として発行することができるように定められた。

この結果、標章（jcss又はJcss）が付けられた校正証明書が発行された計量器は国家標準にトレーサブルであることが示され、信頼性の根拠として利用できるようになった。

### 2.3.2 分光放射照度標準のトレーサビリティ

日電検では1974年から電子技術総合研究所から分光放射照度標準電球（JPD100V-500WCS）に分光放射照度の標準供給を受け、産業界に標準供給を実施してきた。

計量法改正により分光放射照度標準についても特定標準器、特定副標準器及び特定二次標準器が指定され、第1図に示すトレーサビリティ体系が確立した。



第1図 分光放射照度標準のトレーサビリティ体系

### 2.3.3 電子技術総合研究所における分光放射照度標準の確立

1972年、電子技術総合研究所における分光放射照度標準は以下の手順で確立され、その後修正がおこなわれた。<sup>(1)</sup>

#### (1) 分光放射輝度標準の設定

3種類の黒体放射源（金点黒体放射源、ニッケルチューブ黒体放射源及びグラフアイトチューブ黒体放射源）を標準放射源として6個の石英窓つきタングステンリボン電球（GE 30A/T24/13）に分光放射輝度の値付けが行われ、二次標準放射源とした。

金点黒体放射源は IPTS-90 の定義温度 1338.58 K が用いられ、1.2  $\mu\text{m}$  から 2.5  $\mu\text{m}$  の波長範囲で分布温度 2500 K のリボン電球3個と比較測定が行われた。

ニッケルチューブ黒体放射源は 1520 K から 1570 K の温度範囲で動作させ、1.05  $\mu\text{m}$  から

2.5  $\mu\text{m}$  の波長範囲で分布温度 2500 K のリボン電球 3 個と比較測定が行われた。

グラフアイトチューブ黒体放射源は約 2500 K の温度で動作させ、0.25  $\mu\text{m}$  から 2.5  $\mu\text{m}$  の波長範囲で分布温度 2500 K のリボン電球 3 個及び分布温度 2800 K のリボン電球 3 個と比較測定が行われた。

ニッケルチューブ黒体放射源及びグラフアイトチューブ黒体放射源の温度は光高温計によって測定された。また、光高温計は金点黒体放射源を基準として分光放射測定によって校正された。

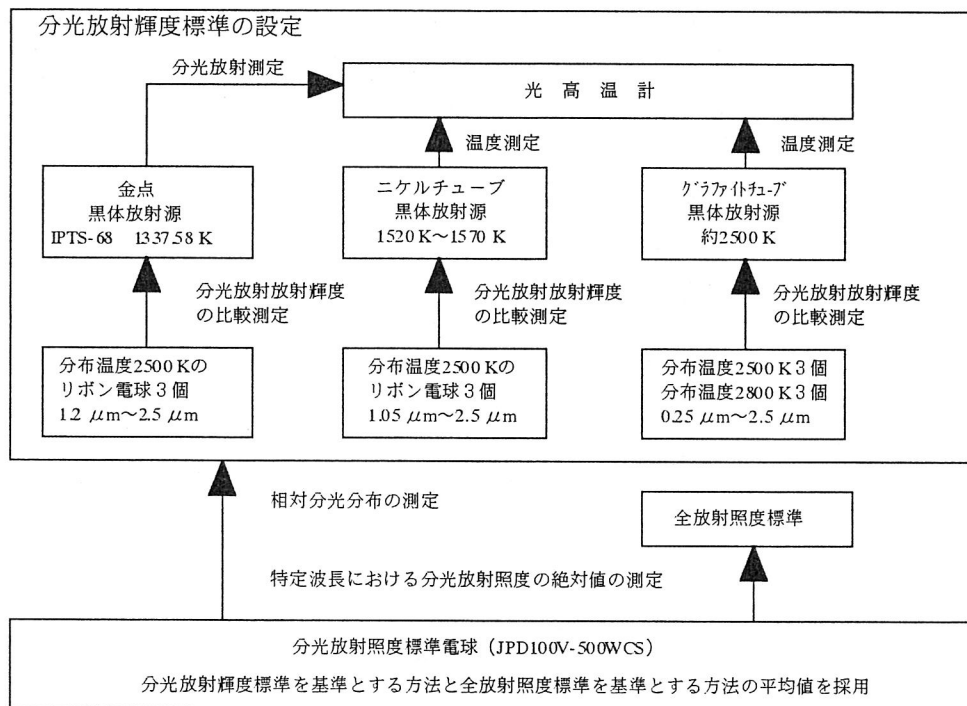
### (2) 分光放射照度標準の設定

分光放射照度標準の設定は、ウシオ電機製の分光放射照度標準電球 (JPD100V-500WCS) 3 個について、分光放射輝度の二次標準 (リボン電球) を基準として相対分光分布の測定が行われ、次に、特定波長における分光放射照度の絶対値の測定が、分光放射輝度の二次標準を基準とする方法と全放射照度標準を基準とする方法の 2 とおりの方法で測定され、その平均値が採用された

### (3) 修正作業について

1990 年、電総研電子蓄積リング TERAS からのシンクロトン放射と分光放射照度標準電球からの放射とを比較測定し、500 nm より短波長域の分光放射照度値に対する修正率を求めた。

また、1968 年国際実用温度目盛 (ITS-68) から 1990 年国際温度目盛 (ITS-90) 採用に伴う修正を施し、各波長における修正倍率を求めた。<sup>(2)</sup>



第 2 図 電子技術総合研究所における分光放射照度標準の確立

### 2.3.4 日本電気計器検定所における分光放射照度標準の供給

日電検では当所の所有する分光放射照度標準電球 (ウシオ電機製 JPD100V-500WCS) と同

分光放射照度試験

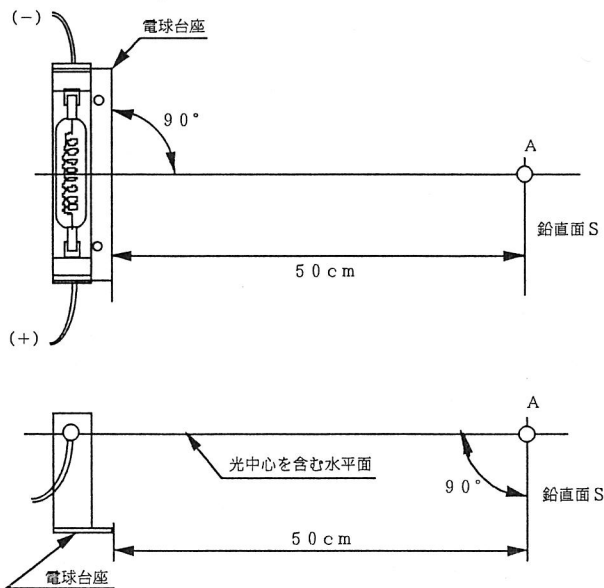
試験電圧 (V) 94.6  
電流測定値 (A) 4.95

波長 (nm)	分光放射照度 ( $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ )	波長 (nm)	分光放射照度 ( $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ )	波長 (nm)	分光放射照度 ( $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ )
250	8.682E-03	500	3.707E+00	1100	1.005E+01
260	1.584E-02	520	4.338E+00	1200	9.152E+00
270	2.628E-02	540	5.004E+00	1300	8.234E+00
280	4.142E-02	560	5.662E+00	1400	7.242E+00
290	6.169E-02	580	6.285E+00	1500	6.334E+00
300	9.068E-02	600	6.911E+00	1600	5.538E+00
310	1.274E-01	620	7.525E+00	1700	4.850E+00
320	1.742E-01	640	8.114E+00	1800	4.233E+00
330	2.324E-01	660	8.677E+00	1900	3.683E+00
340	3.043E-01	680	9.156E+00	2000	3.223E+00
350	3.926E-01	700	9.622E+00	2100	2.810E+00
360	4.944E-01	720	9.995E+00	2200	2.450E+00
370	6.174E-01	740	1.042E+01	2300	2.152E+00
380	7.576E-01	760	1.066E+01	2400	1.878E+00
390	9.162E-01	780	1.084E+01	2500	1.664E+00
400	1.095E+00	800	1.102E+01		
420	1.504E+00	850	1.110E+01		
440	1.980E+00	900	1.110E+01		
460	2.520E+00	950	1.096E+01		
480	3.091E+00	1000	1.074E+01		

試験状態 (1) 電球台座を水平に保ち、直流で点灯した。  
(2) 上記の成績は次頁図上のA点における分光放射照度を示す。

不確かさ 250 nm 以上 360 nm 未満 : 5.1 % (2標準偏差相当)  
360 nm 以上 830 nm 以下 : 3.1 % (2標準偏差相当)  
830 nm 超 2500 nm 以下 : 4.3 % (2標準偏差相当)

室温 22 °C, 湿度 60 %  
試験年月日 平成 11年 12月 10日



第3図 校正証明書の例

じタイプの標準電球についてのみ、標準供給を実施している。

標準電球と同じ分布温度における試験電球の光度値を求め、標準電球の各々の波長における分光放射照度値に標準電球と試験電球の光度比を乗じて試験電球の分光放射照度を求める

$$\text{試験電球の分光放射照度} = \text{標準電球の分光放射照度} \times \frac{\text{試験電球の光度値}}{\text{標準電球の光度値}}$$

### (1) 分布温度試験

分布温度の測定には、安定で直線性の良い光電検出器2個（シリコンホトダイオード）に波長選択性のある色フィルタを組合せて分光応答度の重心波長を2波長（460 nmと660 nm）に合わせた2色比測光器を用いる。

重心波長はJIS Z 8725【光源の分布温度及び色温度の測定方法】による。

標準電球の分布温度（約3111 K）に等しい分布温度になる試験電球の点灯電圧（ $V_t$ ）を求めるには、まず、標準電球による2つの測光器の応答の比を求める。

$$P_s = r_{Bs} / r_{Rs}$$

次に、試験電球による2つの測光器の応答の比を求め、

$$P_t = r_{Bt} / r_{Rt}$$

$P_s = P_t$ となるように試験電球の点灯電圧（ $V_t$ ）を調節する。

こうして得られた点灯電圧（ $V_t$ ）で試験電球を点灯すれば標準電球と同じ分布温度になる。

### (2) 光度試験

光度試験には相対分光応答度を $V(\lambda)$ に近似させた測光器を用いる。

標準電球による $V(\lambda)$ 測光器の読みと試験電球による $V(\lambda)$ 測光器の読みとから、次の式により試験電球の光度値を求める。

$$I_t = I_s \cdot (r_t - r_{dt}) / (r_s - r_{ds})$$

$I_t$  : 試験電球の光度

$I_s$  : 標準電球の光度

$r_t$  : 試験電球についての測光器の読み

$r_{dt}$  : 試験電球点灯時の迷光による測光器の読み

$r_s$  : 標準電球についての測光器の読み

$r_{ds}$  : 標準電球点灯時の迷光による測光器の読み

試験電球の分光放射照度は標準電球の分光放射照度に光度比（ $I_t / I_s$ ）を乗じて求める。第3図に校正証明書の例を示す。

### 参考文献

- (1) 鈴木守、南条基、羽生光宏、長坂武彦、上田勇、湊秀幸：電子技術総合研究所研究報告 第742号
- (2) 西師毅、羽生光宏、香取寛二、齊藤一朗、齋藤輝文、長坂武彦、菅野義之、小貫英雄：電子技術総合研究所彙報 VOL.57,NO.1,1993年

(本間誠一)

## 2. 4 NISTにおける短波長標準の供給及び研究

### 2. 4. 1 概要

筆者は1995年4月から1年3ヶ月間、NIST (National Institute of Standards and Technology、米国メリーランド州 Gaithersburg) の Far UV Physics Group に滞在した。その機会に知り得た内容ならびにその後の情報を加味して、NIST における短波長標準の供給及び研究の現状を紹介する。

NIST は8億ドル (2000年度) の予算で、3300人の職員および1500人の客員研究者を擁しており、さらに全米各地に2000人の製造関連技術者とパートナーシップを結んでいる<sup>1)</sup>。

光放射に関する校正サービスは主として Gaithersburg にある NIST Physics Laboratory の中の Optical Technology Division<sup>2)</sup> が担っているが、シンクロトロン放射に関連した校正サービスは SURF III を有する Electron & Optical Physics Division<sup>3)</sup> の中の Far UV Physics Group で行われている。また、レーザのパワー計、カロリメータ (ならびに光ファイバー) 関連はコロラド州 Boulder にある Electronics and Electrical Engineering Laboratory の中の Optoelectronics Division<sup>4)</sup> で行われている。例えば243 nm のカロリメータ (0.5-15 J)、193 nm のカロリメータ (0.1-1 J) の校正については、Boulder にある Optoelectronics Division で行われている。なお、次節で示すようにアルゴン・ミニアークおよび重水素ランプの分光放射照度等の標準は、Physics Laboratory の中のさらに別の部署である Atomic Physics Division<sup>5)</sup> の中の Plasma Radiation Group で扱われている。

NIST の校正サービスの一覧はインターネット上のサイト<sup>6)</sup> で見ることができる。そのうちの光放射測定に関しては文献<sup>7)</sup> に示したサイトに一覧があるので、参照して頂きたい。Physics Laboratory で行われる校正に関しては、文献<sup>8)</sup> に示したサイトにより詳しい情報がある。

### 2. 4. 2 放射源の標準

NIST は早くから電子蓄積リングを一時標準放射源として用いた校正を行ってきた。筆者の滞在時は電子蓄積リング SURF II の終末 (実際、滞在時に老朽化による故障にも遭遇した) を迎える前であったが、最近の情報によれば、SURF III への更新を無事終えたようである。改造の内容の最大のポイントは、これまで積層鋼板であった偏向電磁石の鉄心を、むくの鉄心に変えること、ならびに電源を交換・増強して電子エネルギーをこれまでの284 MeV から375 MeVにする点である。これによって、磁場の不均一性を大幅に改善し、かつシンクロトロン放射のスペクトルを短波長化し、

校正の不確かさの改善と利用範囲の拡大を目的としている。例えば、絶対分光放射照度については、0.3%以下（相対分光応答度については0.1%以下）の不確かさを目標としている。

SURF II の標準性を活かした校正は主として BL-2 で行われていた（SURF III でも継続されていると考えられる）。このビームラインは NASA からの予算も使って整備されたもので、分光放射照度標準として 4 nm から 400 nm の波長範囲をカバーしている。筆者の滞在時には、NASA 関連の人工衛星搭載のスペクトロメータの校正等に重点的に高い頻度で利用されていた。このビームラインでの内容は、文献<sup>6)</sup>に載っていないので、この校正サービスは一般向けには実施していない模様である。

文献<sup>7)</sup>の中で Optical Technology Division で担当している重水素ランプに値付けした 200-400nm 域の分光放射照度標準の販売等を表 1 に示した。この値付けは黒体放射に基づいている。

表 1

C.1 Spectroradiometric Source Measurements		
Service ID Number	Description of Services	Fee (\$)
<b>NIST calibrates and issues a type 30-watt, deuterium arc lamp mounted in a medium BI-post base.</b>		
39050C	Spectral Irradiance Standard, 30-Watt Deuterium Lamp (200 NM to 400 NM)	8464
39060S	Special Tests of Radiometric Sources	At Cost

文献<sup>7)</sup>のうち、紫外・真空紫外域のアルゴン・ミニアークおよび重水素ランプの校正サービスを表 2 に引用した。これは Atomic Physics Division の Plasma Radiation Group が担当しているもので、現在の起源はどうなっているか不明であるが、少なくとも 1989 年の論文<sup>9)</sup>によると、その分光放射照度の値付けは器壁安定化プラズマによってその相対値を、黒体に基づくタングステン FEL ランプによって絶対値を与えている。文献<sup>7)</sup>の一覧には出ているものの、Physics Laboratory のホームページの校正サービスの一覧<sup>8)</sup>には、本項目が載っていない上、未確認ながら本校正サービスの中断を示唆する情報も伝わっているので、最近実施されているのかどうか定かではない。

表 2

## D. Radiometric Standards in the Ultraviolet

D. 1	Standard	Sources
Service ID Number	Description of Services	Fee (\$)
40010C	Spectral Irradiance Standard, Argon Mini-Arc (140 NM to 330 NM)	3958
40020C	Spectral Radiance Standard, Argon Mini-Arc (115 NM to 330 NM)	3958
40030C	Spectral Irradiance Standard, Deuterium Arc Lamp (165 NM to 200 NM)	At Cost
40040S	Special Tests of Radiometric Devices in the Near and Vacuum Ultraviolet	At Cost

## 2. 4. 3 検出器の標準

2. 4. 1 で述べたように、検出器の標準も担当する Division によって、一次標準が異なっている場合が多い。

200 nm 以上の波長域で NIST Optical Technology Division が供給している検出器の校正サービスを表 3 に示す<sup>10)</sup>。測定の内容は例えば Service ID Number が 39071C のものは、波長間隔 5nm 毎の分光応答度校正に加え、350nm の波長での感度むら測定も含んでいる。当該 Division の分光応答度は一次標準として極低温放射計に基づいている。

254 nm 以下の波長領域の分光応答度については、Electron & Optical Physics Division が担当しており、その供給サービスの一覧を表 4 に示した。当該 Division の分光応答度は、希ガス電離箱に基づいており、適用波長領域を放電管の輝線スペクトルを放射源とし、サーモパイルを用いて拡張している<sup>11)</sup>。これとは別に筆者の滞在時には SURF を一次標準放射源とし、分光透過率を測定できる真空分光器を用いて、より高精度な分光応答度標準を確立しようとする研究<sup>12)</sup>が進められていた。しかし最近の情報によれば<sup>13)</sup>、Optical Technology Division と共同して、真空紫外域においても極低温放射計に基づいて、シンクロトロン放射を放射源として利用し分光応答度標準を確立し、従来の電離箱に基づく標準と置きかえる予定とのことである。SURF II 停止前の実験によれば、125 nm から 400 nm の波長域で最大の不確かさをこれまでの 10% から 2% へと大きく改善することができたと報告されている。この新しい方式で SURF III を用いて、当面 116 nm から 400 nm 域の校正を予定し、以降 5 nm から 116 nm の波長域にも拡張する計画とのことである。

(電子技術総合研究所 斎藤 輝文)

表 3

**Photodetector Measurement Services and Uncertainties**

Service ID Number	Items of Test	Range	Relative expanded uncertainty ( $k = 2$ )	Fee (\$)
39071C	<u>Ultraviolet Silicon Photodiodes</u> (UDT UV100)	200 nm to 500 nm	0.4 % to 13 %	3128
39072C	<u>Retest of Ultraviolet Silicon Photodiodes</u> (UDT UV100)	200 nm to 500 nm	0.4 % to 13 %	2218
39073C	<u>Visible to Near-Infrared Silicon Photodiodes</u> (Hamamatsu S2281)	350 nm to 1100 nm Can be extended to 200 nm	0.2 % to 4 % 0.2 % to 13 %	3221
39074C	<u>Retest of Visible to Near-Infrared Silicon Photodiodes</u> (Hamamatsu S1337-1010BQ or S2281)	350 nm to 1100 nm Can be extended to 200 nm	0.2 % to 4 % 0.2 % to 13 %	2218
39075S	<u>Special Tests of Near-Infrared Photodiodes</u>	700 nm to 1800 nm	0.5 % to 7 %*	At Cost
39080S	<u>Special Tests of Radiometric Detectors</u>	200 nm to 1800 nm	0.2 % to 13 %*	At Cost
39081S	<u>Special Tests of Photodetector Responsivity Spatial Uniformity</u>	200 nm to 1800 nm	0.0024 % to 0.05 %*	At Cost

\* Depends on photodetector and signal level.

表 4

**D.2 Standard Detectors in the Far Ultraviolet**

Service ID Number	Description of Services	Fee (\$)
40510C	Detector Standard, Windowless Photodiode (5 NM to 122 NM)	3294
40511C	Recalibration of Detector Standard (5 NM to 122 NM)	2982
40520C	Detector Standard, Windowless Photodiode (18 NM to 122 NM)	2189
40521C	Recalibration of Detector Standard (18 NM to 122 NM)	1878
40530C	Detector Standard, Windowless Photodiode (52 NM to 122 NM)	1087
40531C	Recalibration of Detector Standard (52 NM to 122 NM)	775
40540C	Uncalibrated Windowless Photodiode	506
40560C	Detector Standard, Windowed Photodiode (116 NM to 254 NM)	11657
40561C	Recalibration of Detector Standard (116 NM to 254 NM)	775
40599S	Special Tests on Detectors from the Ultraviolet (254 NM) to the Soft X-Ray Region (5 NM)	At Cost

---

## 参考文献

- 1) <http://www.eeel.nist.gov/>
- 2) <http://physics.nist.gov/Divisions/Div844/div844.html>
- 3) <http://physics.nist.gov/Divisions/Div841/div841.html>
- 4) [http://www.eeel.nist.gov/eeel\\_pages/815.html](http://www.eeel.nist.gov/eeel_pages/815.html)
- 5) <http://physics.nist.gov/Divisions/Div842/div842.html>
- 6) <http://ts.nist.gov/ts/htdocs/230/233/calibration/index1.html>
- 7) <http://ts.nist.gov/ts/htdocs/230/233/calibration/fees/chap7.html>
- 8) <http://physics.nist.gov/MeasCal/contents.html>
- 9) J. L. Lean, H. J. Kostkowski, R. D. Saunders and L. R. Hughey, *Appl. Opt.* **28**, 3246-3253 (1989).
- 10) <http://physics.nist.gov/Divisions/Div844/facilities/phdet/phdet.html#PMSU>
- 11) L. R. Canfield and N. Swanson, "Far Ultraviolet Detector Standards," Special Publication SP 250-2 (National Bureau of Standards, 1987).
- 12) R. E. Vest, L. R. Canfield, M. L. Furst, R. P. Madden, N. Swanson, *Nucl. Instrum. and Meth.* **A347**, 291-293 (1994).
- 13) <http://physics.nist.gov/TechAct.98/Div841/div841h.html>

### 3. 企業における短波長紫外放射測定の実況

#### 3.1 誘電体バリア放電を利用したXe<sub>2</sub>\*エキシマランプの光出力の測定

##### 3.1.1 誘電体バリア放電励起Xe<sub>2</sub>\*エキシマランプ

真空紫外領域の光源として誘電体バリア放電を励起源とした希ガスエキシマランプが知られている。<sup>1)</sup> 我々は同軸円筒型の誘電体バリア放電励起Xe<sub>2</sub>\*エキシマランプを実用化し、産業用として供給している。

測定に使用したXe<sub>2</sub>\*エキシマランプの概略を図1に示す。<sup>2)</sup> 管径の大きな外側石英ガラス管の中に内側石英ガラス管を同軸に挿入し、両端を閉じて環状の放電空間を形成し、内側管の内面と外側管の外面に電極を設けた構造である。外側管の側面から光を取り出すために外側電極は光透過性の金属網で、内側電極は光反射板を兼ねたアルミニウム電極である。外側管の外径は約25mm、全長は150mm、有効放電長は100mm、放電ギャップは約5mmである。印加電圧は20kHzの正弦波状で、ランプ電力は20Wである。

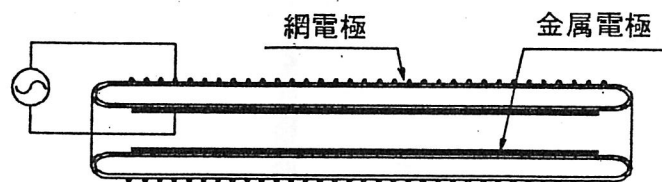


図1 誘電体バリア放電エキシマランプ

##### 3.1.2 測定方法

全ての測定は、窒素雰囲気中あるいは光路を窒素で置換して行った。

後で述べるように、Xe<sub>2</sub>\*エキシマランプは中心波長が172nmで半値全幅が14nmであるXe<sub>2</sub>\*エキシマ光だけを放出するランプなので、172nmを可視光に変換する蛍光体と光電変換素子を組み合わせただけの受光器で172nmを測定出来る。使用した受光器の概略図を図2に示す。受光器は、蛍光体：LaPO<sub>4</sub>:Ce,Tb（緑色の蛍光）、光電変換素子：シリコンフォトダイオードと、ランプ管壁材の石英ガラスから放出される赤色蛍光をカットするための色ガラスフィルタの組み合わせで、受光面積は約13mm<sup>2</sup>である。

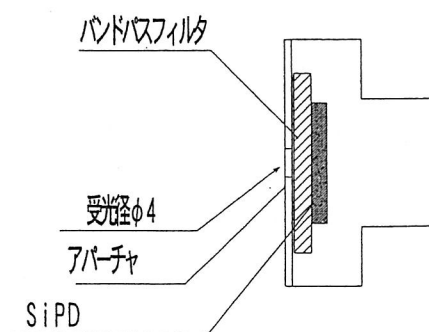


図2 Xe<sub>2</sub>\*エキシマ光の受光器の構造

上記の受光器のXe<sub>2</sub>\*エキシマ光に対する応答度は、あらかじめ分光透過率を測定しておいたバンドパスフィルタ（Acton社、172-N-1D）と熱型検出器を用いて較

正した。

### 3.1.3 測定結果

#### (1) 分光スペクトル

図3に、Xe<sub>2</sub>\*エキシマランプの分光スペクトルを示す。使用した分光器はActon社のVM-502で、装置幅は約1nmである。分光応答度は、300～800nmはハロゲン電球で、200～300nmは埼玉大学で校正した重水素ランプを使用して校正した。200nm以下は校正していない。中心波長が172nmで半値全幅が約14nmであるXe<sub>2</sub>\*エキシマ光が単色光的に得られた。エキシマ光以外の発光は非常に少なく、可視光領域における単位波長当たりの発光強度は、エキシマ光の千分の一程度である。

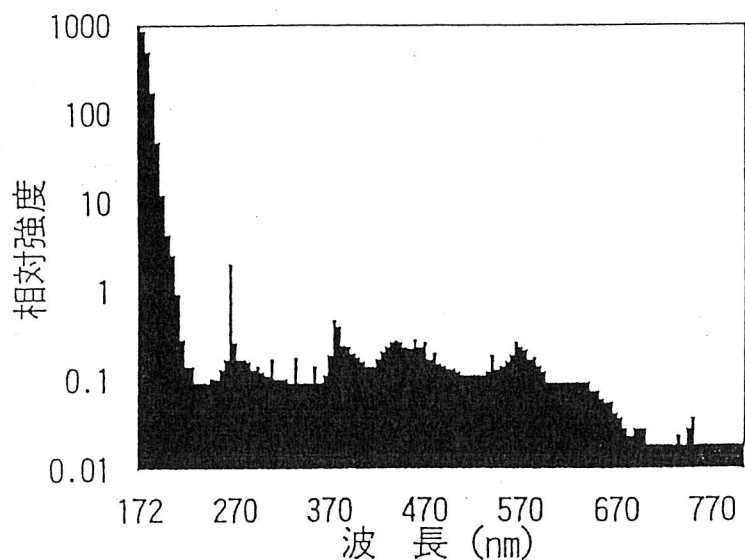


図3 Xe<sub>2</sub>\*エキシマランプの分光スペクトル

#### (2) 全放射束

図4に、Xe<sub>2</sub>\*エキシマランプの配光分布を示す。完全拡散放射源からずれた配光分布になった。この分布を空間的に積分して全放射束を算出した結果、ランプへの入力電力が20Wにおける全放射束は約2Wであった。すなわち、誘電体バリア放電を利用したXe<sub>2</sub>\*エキシマランプの発光効率は約10%である。なお、ランプ電力は、印加電圧—電荷のリサージュ図形から算出した。

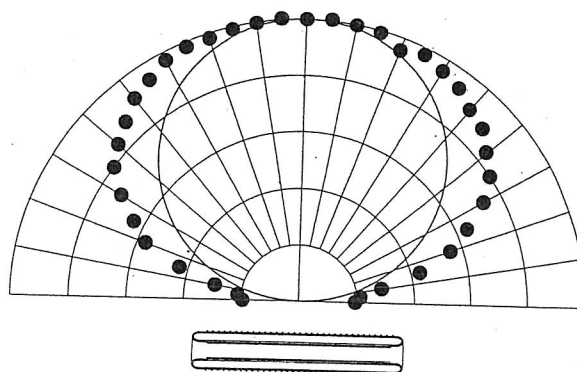


図4 Xe<sub>2</sub>\*エキシマランプの配光分布

(3) 熱型検出器を用いて較正した受光器と NIST の Si フォトダイオードの比較

熱型検出器を用いて較正した前記の受光器と、NIST で値付けしたシリコンフォトダイオードにバンドパスフィルターを組み合わせた受光器の比較を行った。図5に、測定系の概略を示す。光源としてヘッドオン型のXe<sub>2</sub>\*エキシマランプを使用し、ランプと受光器間の光路は窒素で置換した。前者の受光器の読み値を100とした時、後者の受光器の読み値は106となり、良く一致した。

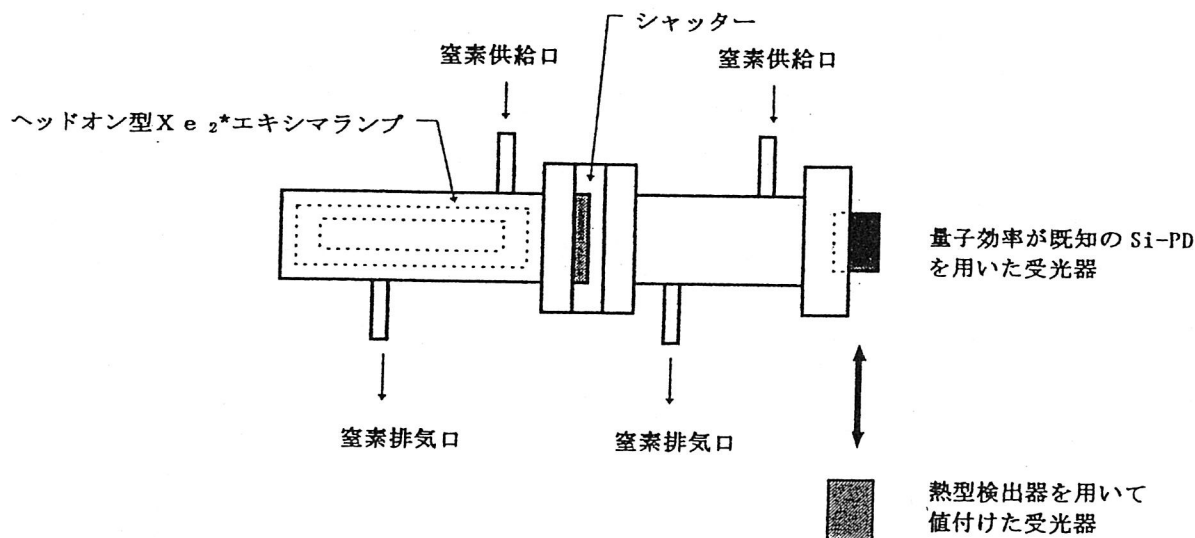


図5 Xe<sub>2</sub>\*エキシマ光受光器の比較測定系

(ウシオ電機株式会社 松野博光)

参考文献

- (1)E.N.Pavlovkaya and A.V.Yakovleva:Continua of Inert Gases in a Barrier Discharge,Opt.Spehtrosc.(USSR) 54,136(1983)
- (2)松野、他6：誘電体バリア放電を利用したXe<sub>2</sub>\*エキシマランプの特性、照学公開研究会資料、8LS-90-20
- (3)B.Eliasson and U.Kogelschatz:Ozone Generation with Narrow-Band UV Radiation ,Ozone:Science&Engng.13(3),365(1991)
- (4)竹元、他5：誘電体バリア放電を利用したXe<sub>2</sub>\*エキシマランプの光出力特性、平成6年照学全大要旨集 26(1994)
- (5)竹元、松野、五十嵐：Xe<sub>2</sub>\*エキシマランプの172nm放射の測定、平成9年照学全大要旨集 243(1997)

### 3. 2 UV領域における検出器の校正

UV領域の検出器の校正方法として、(1)分光器を使用して検出器の分光応答度を測定する方法、(2)光源のある波長を選択・測定し、その波長の光出力を既知として検出器の感度を校正する方法がある。

#### 3. 2. 1 分光器を使用して分光応答度を測定する場合

##### (1)200 nm以下のUV領域の場合

200 nm以下のUV光は、空気中の酸素により吸収され、大気中での測定は困難となるが、真空紫外分光器の使用、もしくは分光器の測定系全体を窒素で満たして、酸素の吸収を減らして分光応答度を測定することができる。

真空紫外分光器の光学系の例を図3.2.1に示す。この方法は、測定部で測定用アパーチャを使用し、試料用検出器と参照用検出器が装着できるため、検出器ホルダーを移動することにより、同じ条件下で測定が可能となり便利である。試料用、参照用と測定のたびに真空状態を解放すると、真空状態に戻るまでの時間がかかる。参照用検出器は、NISTで校正された光電管、またはこれらからトレースされた検出器を装着できるようにしておくことと便利である。MgF<sub>2</sub>窓材の重水素ランプを光源に用いると、120 nm～400 nm付近まで使用することが出来る。

##### (2)200 nm以上のUV領域の場合

分光器を使用して測定できる。光源は重水素ランプが一般的であるが、重水素ランプの場合、長波長側で光出力が低下するため、通常300 nm～350 nm付近でハロゲンランプと切り替えて測定が行われる。250 nm以上の波長域の測定では、キセノンランプを使用すると、光源の切り替えが不要となり連続して測定することができ、また重水素ランプとハロゲンランプの光出力の谷間になっていたところがカバーされる。なおキセノンランプの光による分光器やフィルタへの熱の影響は、「水フィルタ」の使用により低減することができるが、近赤外域からの長波長の光はカットされる。

また、出射側に常設のモニタ用検出器を用意すると、光源の変動がチェックできる。モニタ用検出器には、光路に透明石英板を斜めに設置し、その表面反射光をモニタ用検出器に照射すればよい。透過光は測定用の照射光となる。<sup>1)</sup>

なお、分光器による検出器の分光応答度測定は、照明学会の研究調査委員会報告書「光電素子の相対分光応答度測定方法」に詳細に述べられているので、大変参考になる。<sup>2)</sup>

#### 3. 2. 2 光源の出力から検出器の感度を校正する場合

紫外用光源として低圧水銀ランプ、重水素ランプ、キセノンランプなどがある。

石英材質を窓材とする低圧水銀ランプの場合、185 nm、254 nmの波長を分離すれば、この波長の感度を校正することができる。185 nm干渉フィルタと254 nm干渉フィルタと組み合わせて、それぞれ185 nm、254 nmの輝線を選択できる。185 nmの測定をする場合も、前述のように酸素の吸収により光量は減少する。大気中で測定する場合は、

検出器をランプに近づける必要がある。できれば、窒素で空気と置換できるようなランプハウスの使用を勧める。

ペン型低圧水銀ランプと温度コントローラによる温度調節ブロックと干渉フィルタ・アパーチャを組み合わせた光源装置の例を、図3.2.2に示す。

観測用窓を2カ所以上設けておくと、1カ所をモニタ用として検出器を設置することができ、他の1カ所を測定用窓として干渉フィルタ・アパーチャなどを設定できる。

#### 【注意点】

検出器を校正する場合、アパーチャなどを使用して検出器の有効受光面積内に照射することが大切である。UV領域で照射面が分からないときには、紫外光で蛍光するガラス板やアクリル板などの蛍光板を使用すると照射面を観察することができる。

254 nm常用標準の設定に関して、照明学会の研究委員会報告書JIEG-007b「紫外放射の標準と校正技術」に詳しく述べられている。<sup>3)</sup>

以下に各章のタイトルを紹介する。

### 2. 254 nm常用標準の設定

- 2. 1 GL-10, GL-15の254 nm常用標準放射源としての運用
  - 2. 1. 1 値付けするGL-10, GL-15の選択
  - 2. 1. 2 常用標準放射源としての点灯条件
- 2. 2 受光器標準による254 nm常用放射源の値付け
  - 2. 2. 1 254 nm常用標準受光器を仲介した値付け
    - (1)受光器の値付け
    - (2)254 nm常用標準受光器への値移し
    - (3)254 nm常用標準受光器による254 nm常用標準放射源の値付け
  - 2. 2. 2 フィルタによる254 nm輝線分離法による値付け方法
    - (1)帯域フィルタF1の254 nmにおける透過率T<sub>254</sub>の測定
    - (2)254 nm常用標準放射源の放射照度の値付け
  - 2. 2. 3 標準電球とフィルタによる受光器の絶対応答度の値付け
    - (1)分光放射照度標準電球と帯域フィルタによる方法
    - (2)光度標準電球と帯域フィルタによる方法
  - 2. 2. 4 受光器標準から254 nm常用標準放射源への値付けの確かさ

#### 引用文献

- 1) (社)照明学会：光の計測マニュアル，日本理工出版会 PP.140-142(平2)
- 2) (社)照明学会：光電素子の相対分光応答度測定方法 JIER-052，受光器分光応答度測定方法に関する研究調査委員会報告書(平9)
- 3) 大久保和明：紫外放射の標準と校正技術 JIEG-007b，紫外放射の放射照度測定方法特別研究委員会報告書第2分冊 PP.7-23(平6)

(浜松ホトニクス(株) 須山恵司)

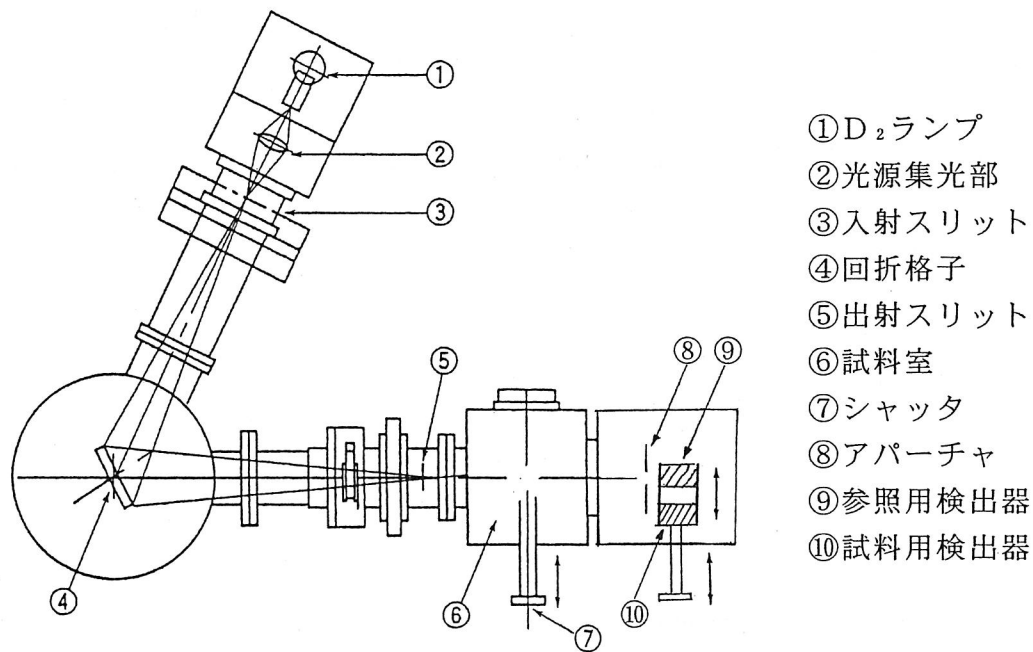


図 3.2.1 真空紫外分光器の光学系の例

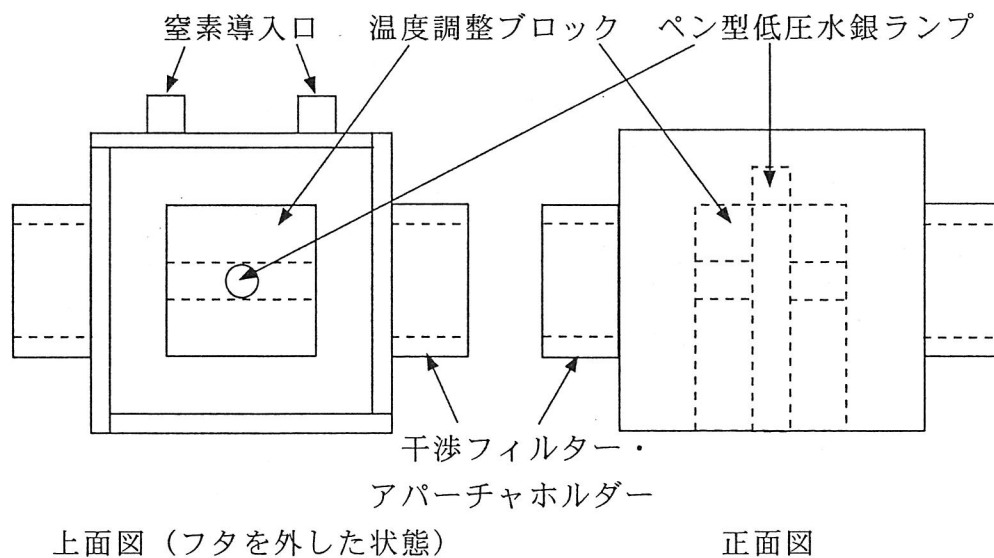


図 3.2.2 低圧水銀ランプの光源の例

### 3.3 UV-185 真空紫外照度計

#### 3.3.1 はじめに

UV-185 真空紫外照度計は、波長域 160～200nm の紫外放射照度の測定用に開発された照度計モニターです。

近年産業各界のUV光の利用は著しいものが有る。食品・医療分野でのUV殺菌、半導体印刷・製版分野での光洗浄、UV硬化、ホトエッチング、アッシング、コーティング、CVD等で利用されている紫外光の照度管理に用いられる。

#### 3.3.2 UV-185 の特長

- ・ 真空紫外光の照度を広い測定レンジで計測できる。
- ・ 連続照度測定でプロセス管理ができる。
- ・ 小型、軽量である。
- ・ 記録計用アナログ出力端子を備えている。

#### 3.3.3 用途

光洗浄、UV硬化、ホトエッチング、アッシング、コーティング、CVD、励起光源等の照度管理に用いる。

#### 3.3.4 UV-185 真空紫外照度計概要

##### 3.3.4.1 構成

図4.1にシステム図を示します。

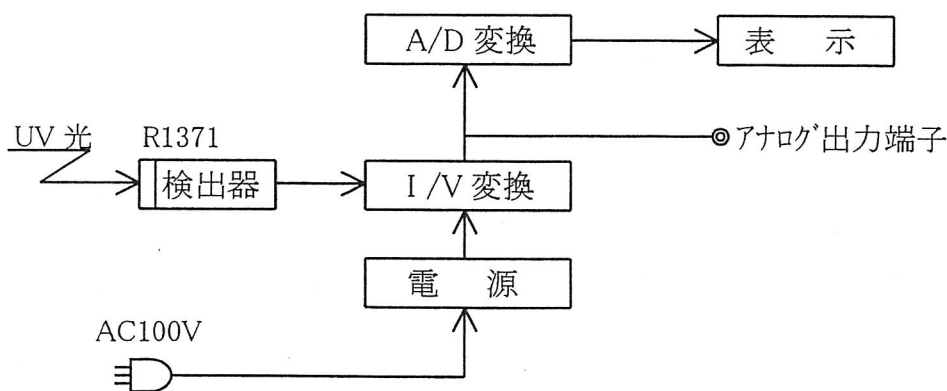


図4.1 UV-185 真空紫外照度計ブロック図

UV光検出器で受光する。光電変換されたUV光の電気信号は主増幅器に入り、電流電圧変換されます。電圧変換されたアナログ信号は、A/D変換器を通り、デジタル信号になり、表示器でUV光強度を表示する。

又、一方のアナログ信号は、記録計用信号として、外部にアナログ信号として、出力される。

##### 3.3.4.2 受光器の構成と特性

###### 1) 検出器

光電変換素子として、真空紫外域のみに応答のある、ソーラブライント光電管(R1371)を使用している。図4.2に光電管R1371の分光応答度特性を示す。

2) 受光窓と減光フィルタ

図4. 3に受光器の構成を示す。受光窓は合成石英を用い片面#600メッシュを加えて拡散効果を高めて有る。又、減光フィルタは、メッシュスクリーンを用い、受光窓前面に置ける構成になっている。

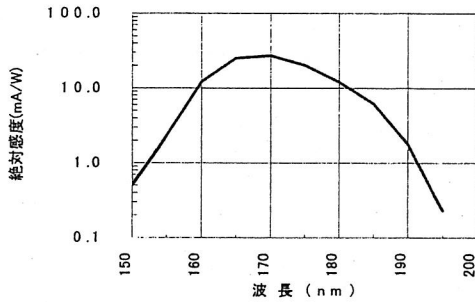


図 4.2 光電管 R1371 分光応答度

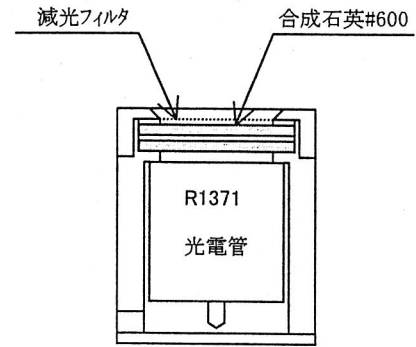


図 4.3 検出器の構造

3) 相対分光応答度

ソーラライト光電管 (R1371) 分光応答度と受光窓の合成石英の分光透過度から、相対分光応答度を求めた。結果を図4. 4に示す。

4) 受光器の入射角特性

UV-185 受光器の入射角特性を図4. 5に示す。COS 特性からの外れが入射角約 20°で 10%となった。

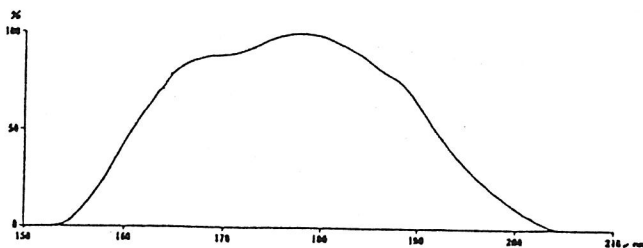


図4. 4 UV-185 相対分光応答度

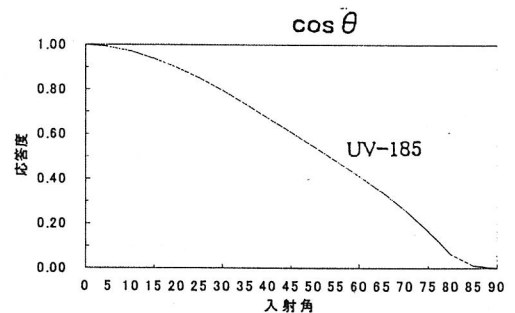


図4. 5 UV-185 入射角特性

5) UV-185 標準受光器の値付け

値付けの測定光学系を図 4.6 に示す。光源に 30W 重水素放電管、凹面反射鏡 M<sub>0</sub> を用い、真空分光器 (ACTON VM502) のスリットに集光する。参照検出器は NIST Si-PD (検定値付) を使用し、標準受光器 (ソーラライト光電管 R1371) に値付けを行う。

モノクロの半値幅は、約4nm (スリット幅 1mm) で窒素パージを行いながら、測定を実施した。光源集光側、試料室側共に、モノクロメータ同様に窒素パージを行い、両者共安定状態にして、測定を行う。

値付けした標準受光器を基準にして、UV-185 照度計の値付け校正を行う。

6) UV-185 照度計の値付け校正

UV-185 照度計の校正は、標準受光器 (NIST Si-PD から値付け) を、ワーキング STD として用いる。UV-185 照度計への値付け校正は、図4. 7のグローブ BOX 内をN<sub>2</sub>パージ下で作業

を行います。

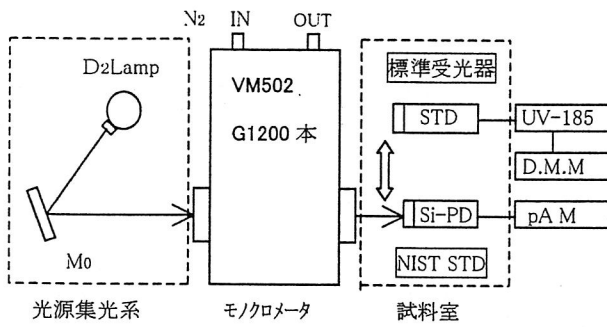


図4.6 UV-185 分光応答度測定系

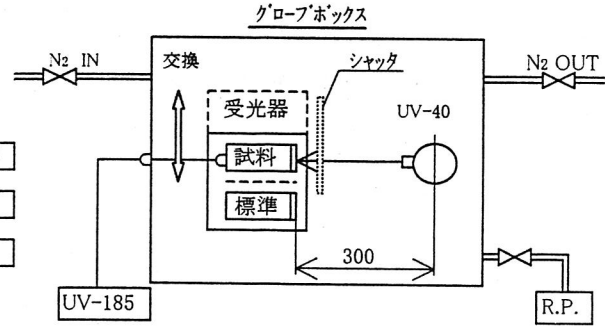


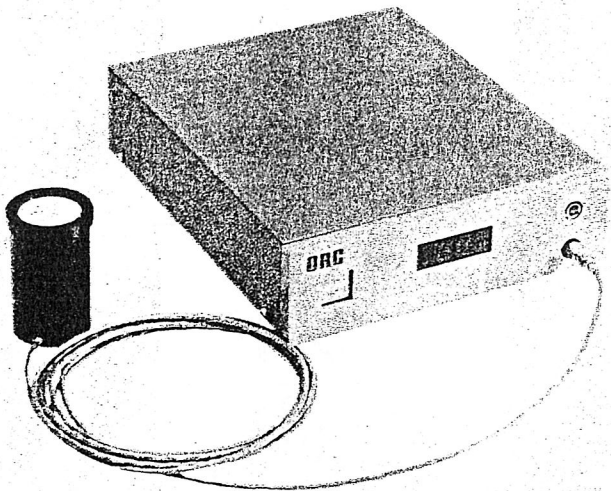
図4.7 UV-185 校正系

7) 185nm の大気の吸収 1)

185nm 放射の測定は、基本的には 200nm 以上の放射測定と同様に行われる。ただし、大気中での吸収と、主たる測定対象物である、低圧水銀灯の放射特性を考慮しなければ、正しい結果を得ることは出来ない。

185nm 大気の吸収係数 ( $\alpha$ ) は、Beer の法則  $I=I_0 \exp(-\alpha L)$  となる。吸収係数 ( $\alpha$ ) は一様な媒質中での定数となるが、185nm の吸収 (酸素による) でオゾンが発生し、二次吸収を起こすために Beer の法則には従わなくなり、吸収係数は定数でなく、距離の関数となり以下の式になる、 $I=I_0 \exp\{-(\alpha - \beta L)L\}$  真空中と気中測定の結果とがほぼ一致したと、報告されている。

3.3.5 UV-185 真空紫外照度計 仕様



仕様

測定波長域	153~203nm
ピーク感度波長	176nm
照度測定範囲	0.1~20000 $\mu w/cm^2$
表示	3 1/2 桁
使用温度範囲	0~50°C 但し露結しないこと
測定精度	±20%
記録計出力	2V フルスケール
電源	AC100V ±10V 10VA
寸法・本体	210W×260D×65H, 3 kg
重量 受光器	49φ×76H mm, 250g
付属品	減光フィルタ 1/10・1/100

参考文献

- 1) 中川靖夫、大谷文雄、原正史、勝部昭明、谷治環、安達伸雄、相原清：紫外185nm放射の測定  
照学誌 72-6(昭 63)

((株)オーク製作所 媚山義光)

### 3. 4 日立製作所の紫外線ランプについて

紫外線ランプの内、主に分光用光源として用いられている重水素ランプおよびメタルハライドランプについて紹介する。

#### 3. 4. 1 重水素ランプ(885-3570)

重水素ランプは重水素ガスのアーク放電ランプで、陽光柱の一部を狭窄して、この部分から紫外部に強い連続スペクトルを発光している。重水素ランプの外観写真を図1に示す。

日立では寿命要因および放電メカニズムの検討を行い、長寿命化には、陰極の電子放射材の重量を増やすことが最も効果的であると考えられた。このため構造の簡単な直熱形陰極で、新たに三重コイルフィラメントを設計し、長寿命化を実現した。また放射輝度の低下の要因を検討した結果、初期の低下は窓材(合成石英)の透過率の低下によるが、その後はガス圧力の低下によるものであると推定できた<sup>1)</sup>。重水素ランプを標準として用いるには、初期の放射輝度低下が無くなるまで点灯した後に用いるのが良い。

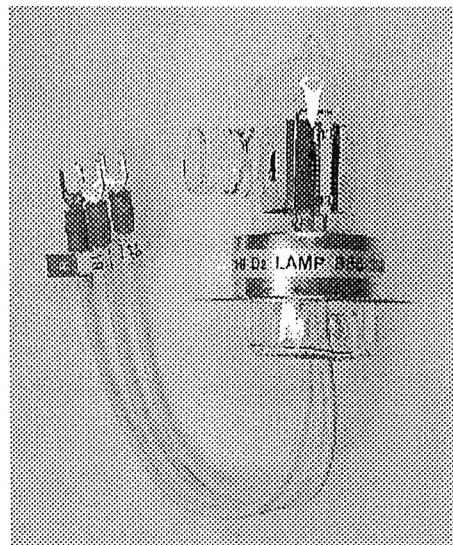


図1. 重水素ランプ(885-3570)

#### 3. 4. 2 メタルハライドランプ(050-0280)

液体クロマトグラフなどで用いられる分光用光源として、紫外部の比較的広い範囲で輝度が高く、安定で長寿命の紫外線光源として、メタルハライドランプを用意している。構造を図2に、発光スペクトルを図3に示す<sup>2)</sup>。直流0.55Aの定電流で点灯する。

紫外部の発光強度は重水素ランプと比較して約220nmより長波長側で高輝度であり、重水素ランプは長波長になるほど弱くなるのに対し、メタルハライドランプは約450nmまで高い放射輝度を持っている。Hg<sub>2</sub>分子やHgI分子の連続スペクトルの上にHg原子の輝線スペクトルが重畳されている。Hg共鳴線の254nmでは自己吸収により、放射輝度は低くなっている。

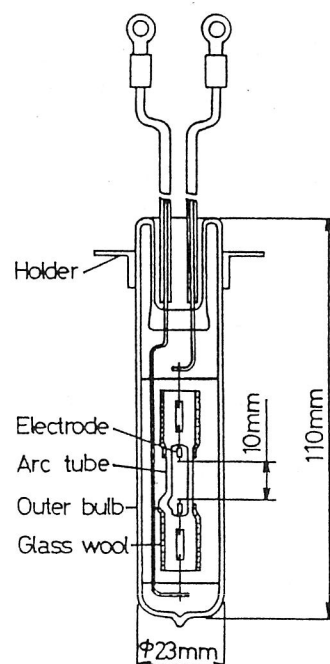


図2. メタルハライドランプ(050-0280)

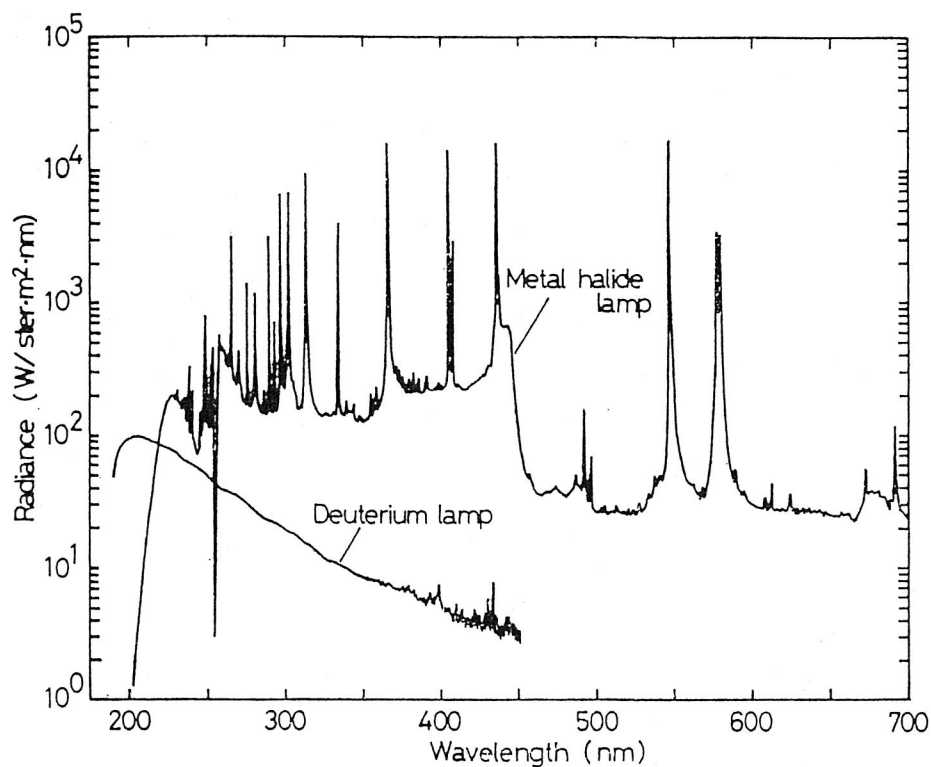


図3. 分光放射輝度

放射輝度の変動の代表例は次のようになる。放射輝度の短時間的な揺らぎは測定系の応答速度が0.4秒の時、0.2%であった。放射輝度の長時間的な低下として、2000時間の放射輝度は、初期値と比較して、230 nmで48%、280 nmで59%、325 nmで71%、365 nmで72%であった。このランプの詳細は文献2)を参照されたい。(安田誠)

- (1) 安田誠ほか：長寿命重水素ランプの開発、H5照明学会全国大会、p.13 (1993)
- (2) 安田誠ほか：分光測定用メタルハライドランプ、分光研究、37-1、pp.24-29 (1988)

(これらのランプは日立計測器サービス㈱から購入することができる。)

### 3. 5 ニッポ電機の紫外線ランプとその測定方法

#### 3. 5. 1 まえがき

UV-C 領域を放射する紫外線ランプには、低圧水銀ランプ及び、高圧水銀ランプ、メタルハライドランプ、UVエキシマランプなどがあり、半導体産業及び、液晶産業、食品産業、製薬工業など広く産業界で利用されている。ここでは、半導体製造用超純水、医療用無菌純水、清涼飲料水、廃水二次処理水、風呂循環水などの水殺菌、食品包装資材、医療用具、食品製造機材、医薬品充填容器などの表面殺菌、手術室、食品工場、製薬工場などの空気殺菌の殺菌分野に使用されている主波長 253.7nm を放射する低圧水銀ランプの紫外線照度及び、紫外線照度分布、放射束について、そしてシリコンウエハや液晶基板ガラスなどの精密ドライ洗浄・表面改質及び、有機塩素系難分解物質（アセトアルデヒド、トリメチルアミンなど）や有害物質（ダイオキシン、トリクレンなど）の酸化分解除去などの光酸化反応分野に使用されている主波長 184.9nm と 253.7nm を放射する低圧水銀ランプの相対分光分布の測定方法について記載する。

#### 3. 5. 2 紫外線ランプ

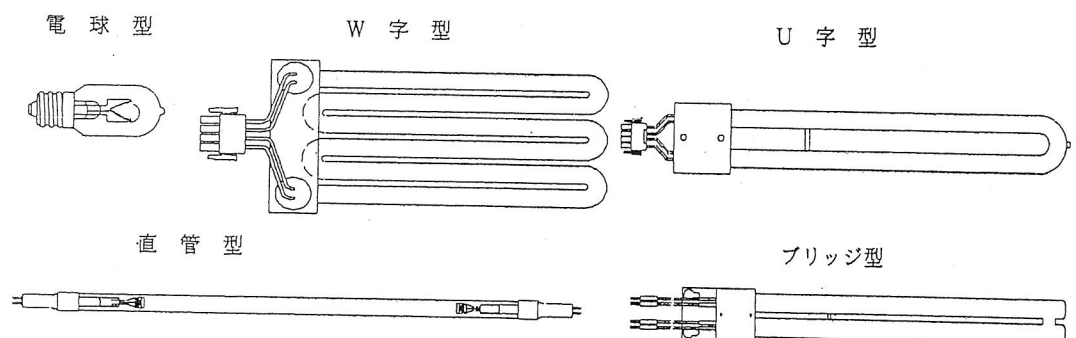
低圧水銀ランプからは、主に水銀共鳴線波長 184.9nm と波長 253.7nm の UV-C 領域の紫外線が放射される。殺菌作用スペクトルの殺菌効果の最大波長付近であり<sup>1)</sup>、波長 200nm 以下を透過しない石英ガラス又は紫外線透過ガラスを使用して主に波長 253.7nm を放射する紫外線ランプを殺菌用紫外線ランプと称している。

紫外線は電磁波であり、 $E=h\nu=hc/\lambda$  の式を用いて波長 184.9nm 及び波長 253.7nm の有するエネルギーを算出すると 155[kcal/mol]及び 113[kcal/mol]となり、多くの有機化合物の化学結合エネルギーより大きく、有機物の結合を直接分解させるエネルギーをもち、波長 200nm 以下を透過する合成石英ガラスを使用して主に波長 184.9nm と波長 253.7nm を放射する紫外線ランプを光酸化反应用紫外線ランプと称している。

##### (1) 殺菌用紫外線ランプ

殺菌用紫外線ランプ(以下殺菌ランプ)は用いられているガラス材質によって石英ガラス製殺菌ランプと紫外線透過ガラス製殺菌ランプに大別され、石英ガラス製殺菌ランプは軽負荷・常温用及び低温用と水銀アマルガムにより水銀蒸気圧を抑制した高負荷及び高温用殺菌ランプに大別される。高負荷殺菌ランプには主に石英ガラスが用いられ、管径 15mmφ～35mmφの直管型及び、U字型、スパイラル型、電球形形状のものがあり、その例を図 3.5.1<sup>2)</sup> に示す。

図 3.5.1 殺菌ランプの形状



## (2) 光酸化反応用紫外線ランプ

光酸化反応用紫外線ランプには合成石英ガラスが用いられ、軽負荷用と水銀冷却又は水銀アマルガムにより水銀蒸気圧を抑制した高負荷用に大別される。その種類には管径8mmφ～25mmφの直管型及び、U字型、W字型形状のものがある。

### 3. 5. 3 紫外線ランプの測定方法

#### (1) 殺菌ランプの測定方法

紫外線による殺菌効果は微生物の種類によって異なり、各々の微生物の殺菌率に対する必要な紫外線照射量<sup>2)</sup>が指標として用いられている。この紫外線照射量はX線の場合に用いられる吸収されたエネルギーではなく、入射エネルギーで定義され、慣例では紫外線照度[μW/cm<sup>2</sup>]と照射時間[sec]の積[(μW/cm<sup>2</sup>)・sec]が用いられている。確かに、紫外線照度は殺菌ランプの性能を表す重要な指標の一つであるが、殺菌ランプと被照射物との距離によって変化し、ランプの形状・管径によっても大きく変化する。ここでは直管型紫外線ランプの紫外線照度と紫外線照度分布及び放射束の測定方法について記載する。

#### a) 紫外線照度と紫外線照度分布の測定方法

紫外線照度計 UVR-2(受光器 UD-2、株式会社トプコン製)及び、パルスステージ (X,Y,Z軸可変、0.005mm/パルス)、パルスステージ駆動とデータ演算処理を行うコンピュータから構成される測定系に殺菌ランプをセットし、ランプ軸直下長さ方向及びランプ長中央管径方向の紫外線照度を測定し、紫外線照度値[μW/cm<sup>2</sup>]又は紫外線照度分布でアウトプットされ、その測定結果例を図3.5.2に示す。

#### b) 放射束の測定方法

殺菌ランプ長中央部からランプ長さの約4倍の位置に紫外線照度計をセットして、三照度法で紫外線照度を測定し、次式で放射束を算出している<sup>3)</sup>。

$$P = \{4.78I_{90} + 3.60(I_{45} + I_{135})\}L^2 [W]$$

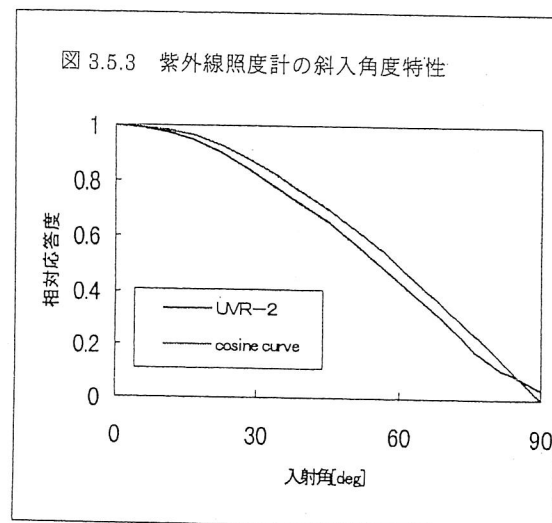
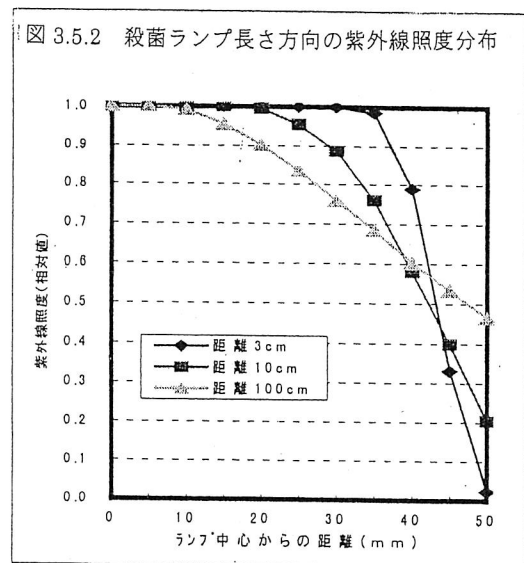
ここで、 $I_{90}$  : 90°方向の殺菌線照度[W/cm<sup>2</sup>]

$I_{45}$  : 45°方向の殺菌線照度[W/cm<sup>2</sup>]

$I_{135}$  : 135°方向の殺菌線照度[W/cm<sup>2</sup>]

#### c) 紫外線照度計の校正

埼玉大学で値付けされたGL-15を254nm常用標準光源の放射照度値付け方法<sup>4)</sup>に準じた測定系(ランプとの距離1.25m)に紫外線照度計をセットし、紫外線照度を測定し校正している。なお、上記の測定系における紫外線照度計の斜入射角度特性を図3.5.3に示す。



(2) 光酸化反应用紫外線ランプの測定方法

a) 標準ランプ

ペン型低圧水銀ランプ L937-01(以下ペンランプ)及び、酸素センサ、ヒーター、合成石英ガラス窓から構成され、合成石英窓から 60mm の距離のペンランプから放射される水銀共鳴線を値付けされたもの(浜松ホトニクス株式会社製)を用いた。そのペンランプハウスを図 3.5.4 に示す。

b) 分光分布の測定方法

回折格子型紫外分光器及び、GaAs 光電子増倍管、データ演算処理と分光器駆動を行うコンピュータ、窒素ガスでパージされた光路で構成される測定系に光酸化反应用紫外線ランプをセットして、分光分布(相対値)でアウトプットされる。その測定結果例を図 3.5.5 に示す。

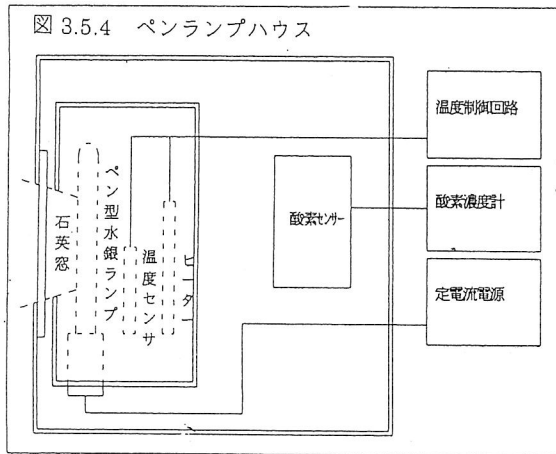
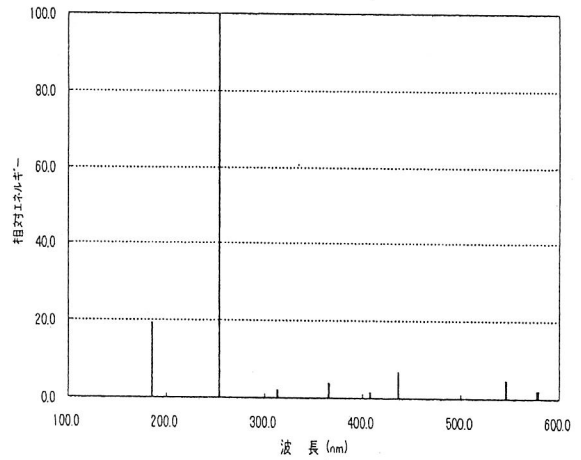


図 3.5.5 光酸化反应用紫外線ランプの分光エネルギー分布 (SGL - 1000NZ 当社製)



(ニッポ電機 古海 浩)

参 考 文 献

- (1) ニッポ電機(株) 紫外線総合カタログ
- (2) M.Luckiesh : Applications of Germicidal , Erythemat and Infrared Energy (1946)
- (3) 佐土根範次、森田政明：殺菌灯、ブラックライトの全光束の測定、電気試験所彙報、第 25 巻、第 29 号
- (4) 紫外線放射の放射照度方法特別研究委員会報告書 第 2 分冊、照明学会(平成 6 年)

### 3. 6 岩崎電気の紫外線ランプとその測定方法

#### 3. 6. 1 紫外線ランプ

##### (1) 概要

紫外放射を利用した技術は、殺菌・浄化、半導体製造、塗装・接着等の表面加工など様々な用途に使用されており、また今後も各分野への拡大、発展が見込まれる。当社では、これらニーズにあわせ多種類の紫外放射用ランプを製造しており、また、これらランプはそれぞれの光源装置との組合せによって十分な性能が発揮できるよう配慮されている。

当社における主な紫外線ランプ製品群とその応用例を表1に示す。

表1 紫外線ランプ製品群と応用例

区分	紫外線ランプ製品群	応用例
殺菌・浄化	殺菌ランプ(低圧水銀ランプ)	空気・水・表面の殺菌 湖沼・下水・工場排水の処理
	熱陰極ランプ(ブラックライト型)	抗菌、光触媒用光源
	パルスドキセノンランプ	各種殺菌(カビ孢子)、畜産排水処理
紫外線硬化	UVキュア一用高圧水銀ランプ	インキ・樹脂・塗料・接着剤・フォトレジストの硬化
	UVキュア一用メタルハライドランプ	光ファイバーコート材、コンパクトディスクコート材
	パルスドキセノンランプ	DVD製造装置
半導体製造	i線ランプ(超高圧Hgランプ)	ステッパー用光源
	オゾン洗浄用ランプ	半導体、液晶基盤の洗浄
	UVキュア一用水銀ランプ、メタハラ	半導体レジストの硬化
	低圧水銀ランプ(紫外線酸化分解)	超純水製造装置
	エキシマランプ	半導体・液晶基盤の洗浄
表面改質	オゾン改質用ランプ	ゴム・シリコン樹脂の表面改質
	エキシマランプ	

次に、各ランプの特長とその応用を解説する。

##### (2) 殺菌ランプ(低圧水銀ランプ)

殺菌ランプは、水銀の低蒸気圧中の放電で発生する254nmの紫外線を効率よく放射するように設計された低圧水銀ランプである。殺菌ランプと呼ばれるのは、254nmの紫外線が殺菌線(波長260nm付近の紫外線は高い殺菌作用を有する)と呼ばれるためである。

殺菌ランプの応用は、食品衛生、医療分野で歴史が古いが、昨今の環境問題をとりまく諸事情により、環境改善にも一役かわれている。たとえば、水処理における塩素消毒は使用法を誤ると発ガン性物質であるトリクロロメタンを発生しかねないが、紫外線による消毒は塩素使用量を極力抑えることができる。

殺菌ランプの構成図を図1に示す。殺菌ランプには、数W～数百Wまでの製品があり、様々な用途向けに最適設計がされている。

当社の殺菌用低圧水銀ランプの発光管には、通常オゾンが発生しないように微量の酸化チタンを含むオゾンレス石英ガラスが使用されているが、超純水製造に使用される紫外線酸化分解装置やオゾンによる洗浄・改質の用途には、発光管に通常の石英ガラスや合成石英ガラスが用いられる。

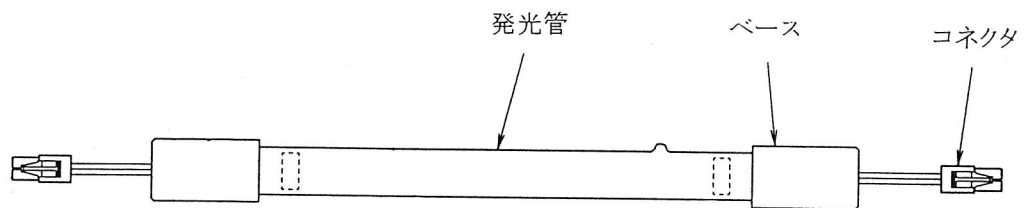


図1 殺菌ランプ

### (3) UVキュアー用ランプ

UVキュアー用ランプには厳密な定義が無いが、紫外線硬化性インキ・樹脂の乾燥硬化のため250nm～450nmの範囲で効率よく光を放射するように設計されたランプである。古くは高圧水銀ランプと感光性樹脂の組合せによる実用化に発し、硬化材料の進歩とともにインキ、塗料、接着剤などその用途は広いが、光ファイバーコート材、光ディスクコート材、フォトレジストなど現在でも応用分野は広がっている。

UVキュアー用ランプは、数百W～数十kWまで、発光長は50mm～2500mmまで顧客の要求に合わせて数百種類のランプがあり、水銀ランプよりも効率が高いメタルハライドランプが製品化されている。

この種の用途では、インキや樹脂が吸収する波長とランプの放射する波長とを一致させることがシステムの効率アップにつながるのでメタルハライドランプには鉄系、ガリウム系など数種類がある。

### (4) パルスドキセノンランプ

パルスドキセノンランプは、紫外線域から可視域まで幅広いスペクトルを発するフラッシュランプである。発光物質が希ガスであることから動作時の温度が低い、瞬間繰り返し発光が可能などの特徴がある。さらに瞬間発光時には従来の連続発光ランプと比較して10～100倍の高照度の光が得られるので、新しい光反応光源として注目されている。

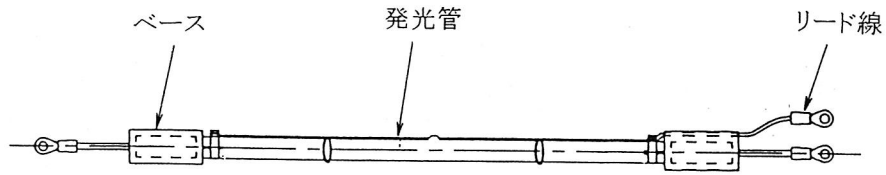


図2 パルスドキセノンランプ

(5) i線ランプ (超高压水銀ランプ)

i線ランプはICやLSI製造の露光工程に使用される光源である。ICやLSIは年々集積度を上げることにより進歩してきたが、そのためにひとつひとつの素子の大きさやそれぞれを結ぶ線幅を小さくしてきた。その結果、露光に用いられる光源の波長もg線(435nm)からi線(365nm付近の4本のスペクトル群)へと短波長化してきた。これは、露光波長が短いほど細かな加工が可能となるためである。i線ランプを用いた半導体露光装置では、0.3ミクロン程度の最小加工線幅が達成されている。

図3にi線ランプの構成図を示す。i線ランプは、直流点灯で動作し、アーク長は4mmのショートアーク型超高压水銀ランプである。

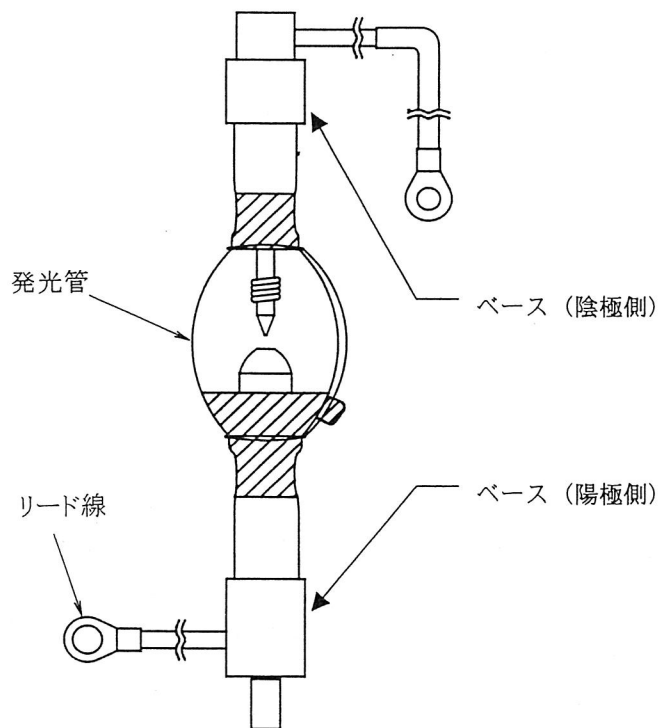


図3 i線ランプ

## (6) オゾン洗浄・改質用ランプ

液晶用ガラス基盤、シリコンウエハ、アルミやステンレス基盤などの表面に付着した有機物の精密洗浄や、プラスチックや高分子材料の表面の改質にオゾン洗浄・改質用ランプが使用されている。

オゾン洗浄・改質用ランプは低圧水銀ランプの一種である。図4に構成図を示す。オゾン洗浄・改質とは、次のような作用効果によるものである。まず、ランプから放射される185nmの光を酸素が吸収することによってオゾンが発生する。つぎに254nmの光をオゾンが吸収し、分解して活性酸素が生じる。この活性酸素がきわめて反応性が高いため、有機物と作用してガス化し表面の洗浄作用をもたらしたり、高分子の先端に作用してぬれ性など特性を変化させることができる。

従来のこの種のランプは、発光管に合成石英を使用し185nmの放射強度を高め、高ワット動作のためランプベース部を水冷して使用されるが、寿命が1000～2000時間と短いことが欠点であった。現在では、特殊処理がなされた発光管と封入ガス圧・電極設計の最適化、専用電子安定器とのマッチングにより寿命は2～4倍の4000時間、紫外線出力維持率は従来の60%から80%へと特性を向上させることが可能となっている。

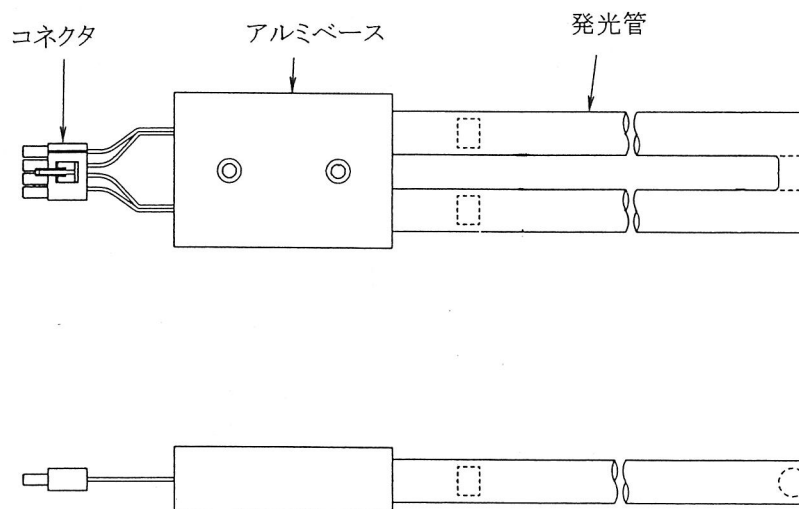


図4 オゾン洗浄・改質用ランプ

## (7) エキシマランプ

エキシマとは励起二量体Excited dimerを意味する。エキシマランプは、発光管内に封入されたガスが放電プラズマによって励起されて、瞬間的にエキシマ状態になり、再度もとの状態に戻るときの発光（エキシマ発光）を利用したランプである。封入ガスの種類によって選択的に単色性の高い光を得ることができる。特にエキシマランプによる（真空紫外線域の）短波長光は高いエネルギーを有するので、次世代の光化学反応用光源として期待されている。

### 3. 6. 2 紫外放射域の測定

以上述べたように当社には様々な紫外放射を応用した製品があるため、それに関連して測定すべき紫外域の波長範囲は多岐にわたる。各ランプと測定する波長範囲を表2に示す。

表2 各種ランプと測定を必要とする波長範囲

ランプ種類	波長範囲 (nm)
殺菌ランプ (低圧水銀ランプ)	254 nm
低圧水銀ランプ (オゾン洗浄用など)	185 nm、254 nm
UVキュア用高圧水銀ランプ	300~400 nm
UVキュア用メタルハライドランプ	300~400 nm
i線ランプ (超高圧水銀ランプ)	365 nm付近
エキシマランプ	172 nm

現在、当社で所有し紫外放射の標準として扱っているものは、

- ・分光放射照度標準電球
- ・殺菌ランプ (GL-15)
- ・クレフト水銀ランプ

等がある。分光放射照度標準電球を除いては、国家機関とのトレーサビリティ体系がないため埼玉大学などの研究機関にて値をつけていただいたものである。これら標準を使用し、製品の紫外放射量を測定する場合、標準・製品間の放射照度の違いが大きいため2次、3次など仲介する受光器及びランプを使用している。また、当社にて標準を所有していない波長範囲200nm以下は、市販されている放射照度計を使用し測定している。

実際の紫外放射関連製品の評価では、測定する放射照度計を決め、被照射物の反応・効果の度合いとその放射照度計の表示値を関連付けて、製品の放射量を管理する方法もとられている。また、客先との取り決めで、この放射照度計で測定した時 $0.01\text{mW/cm}^2$ 以上であればよいとしている場合もある。これらの場合、絶対的な値付けは必要ないので、定期的に放射照度計の経時変化のみ確認を行なっている。しかし、これらの方法は汎用性がなく、例えばその放射照度計が使用できなくなった場合などを考慮しなければならず、また、数値を一般的に扱えないことによる製品開発の遅れなど問題がある。

現在、放射照度計は、標準及び校正方法等の理由でメーカーにより測定値が異なっている。よって放射照度計で測定を行なう場合には、分光応答度、値付けに使用した光源、入射角特性及び高温度・高照度での使用による劣化等を考慮に入れ使用する必要がある。

(岩崎電気 小井土)

### 3. 7 短波長紫外線の測定について

#### 3. 7. 1 はじめに

弊社は紫外線応用装置として”洗浄装置”、”露光装置”、”印刷機”、”水処理装置”などを製造販売しており、ランプ・装置とも社内で製造している。

紫外線の測定はランプの開発時やランプ・装置の出荷検査に必要な技術であり、常日頃からその測定法の向上には努めている。

以下に弊社が行っている紫外線測定の一部とその問題点について報告する。

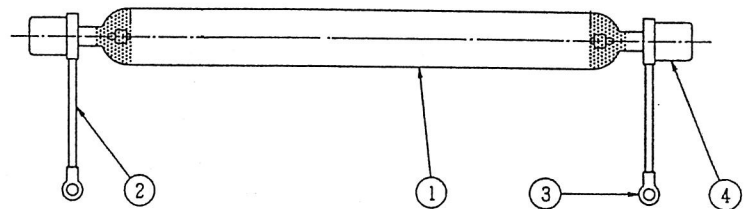
#### 3. 7. 2 紫外線測定例

##### (1) 365 nmの測定例

##### a. 1重管式水銀ランプ (図1) とメタルハライドランプ

用途：UVインクの乾燥、  
UV硬化樹脂の硬化用

石英の発光管を用いており、  
220 nmの紫外線から近赤外線まで  
放射し、塗料の硬化等に有効な  
365 nmを主波長とする。



部番	部品名	個数	材質
①	発光管	1	透明石英ガラス
②	絶縁チューブ	2	テフロンチューブ
③	端子	2	銅 (スズメッキ)
④	ベース	2	ステアタイト

##### 特徴

定格電圧	2350 V
ランプ電力	224 kW
ランプ電圧	1620 V
ランプ電流	14.4 A
点灯方式	空冷水平点灯

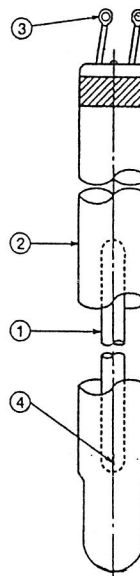
##### b. 2重管式水銀ランプ (図2)

用途：光化学反応、  
超純水製造用

外管バルブによってほぼ 300 nm以下の  
紫外線は吸収されるタイプと透過するタイプ  
の2種類に分類される。

365 nmの測定は、メーカーの紫外線強度計  
を利用している。

発光長が300~2000mmと幅広く、  
特に長尺ランプにおいては、絶対値を算出  
するに当たって十分な測定距離が確保でき  
ず、測定条件等を固定し品質レベルの確認  
を主に実施している。



部番	部品名	個数	材質
①	発光管	1	透明石英ガラス
②	外管	1	硬質ガラス
③	端子	2	リード線 (テフロンチューブ付)
④	電極	2	—

##### 特性 (標準値)

定格電圧	3300 V
ランプ電力	10 KW
ランプ電圧	1950 V
ランプ電流	5.6 A
点灯方式	水冷鉛直点灯

図2 東芝光化学反应用水銀ランプ

(2) 254 nmの測定例

低圧紫外線ランプの紫外線量を評価するのに254 nmを使用している。

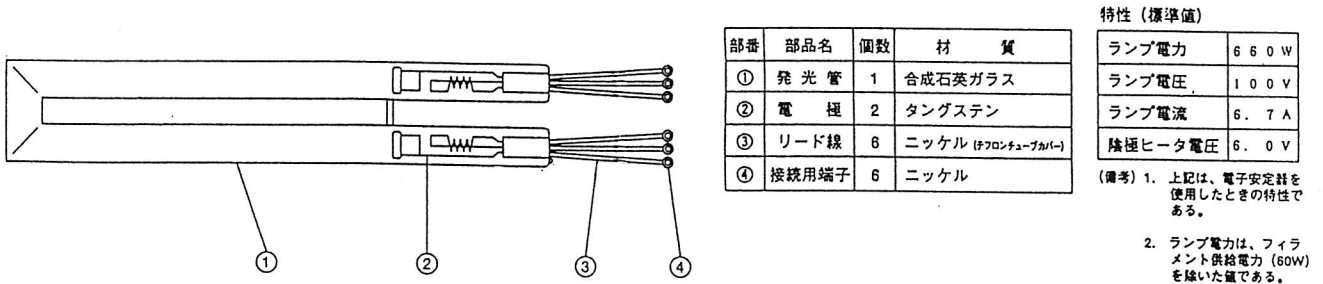


図3 東芝光洗浄用低圧水銀ランプ

a. 高出力紫外線ランプ (図3) の評価

(品種は300~1000 Wまでである。)

主に液晶製造プロセスにおけるガラス基盤ドライ洗浄用等に使用されるためランプ直下10~50mm (図4) での照度が要求される。

そのためセンサ個々間の角度特性のバラツキや受光面の感度のバラツキにより前記測定距離では同一仕様のセンサであっても値に差が生じてしまうため、(365nm用と同様に) 受光器のシリアルNo. 固定などによって、測定レベルの維持を測っている。<sup>1)</sup>

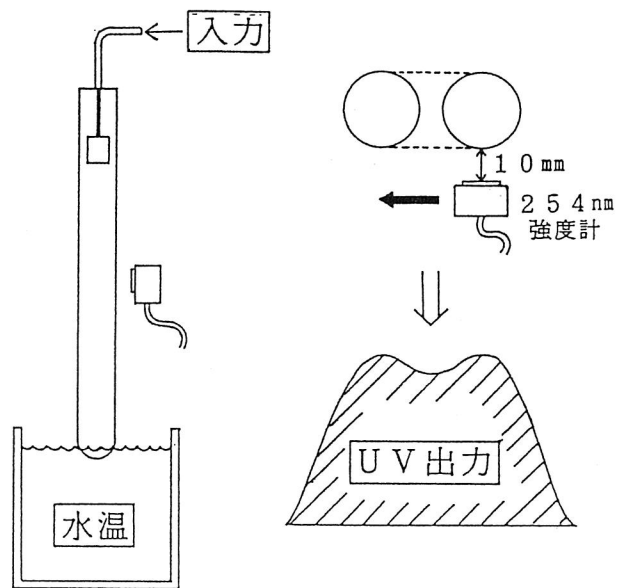


図4 測定方法

b. 冷陰極殺菌ランプ (図5) の評価 (品種は5~6 W程度である。)

本ランプは主に家庭内で使用される器具に装着されて流体の殺菌に使用される。

ランプが小さく、ランプを点光源として見なせる発光長の10倍の距離を確保して測定することが可能である。

しかし、紫外線の絶対出力が低い場合更に感度の高い照度計を希望する。

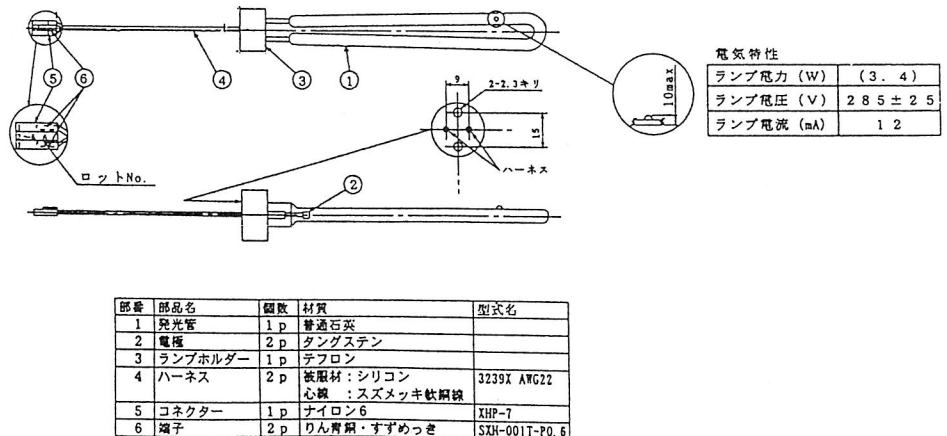


図5 東芝冷陰極殺菌ランプ

(3) 185 nmの測定例

185 nmは気中の減衰が大きい。低圧水銀ランプを窒素中で水銀蒸気圧を制御して点灯することやセンサの角度特性の評価は技術的には可能であるが非常に手間のかかる作業となる。

測定方法は、図4と同一の方法であり、測定距離が短いこと及び測定器の設置場所が狭いため、特定の受光器でしか測定できない。

簡易的には気中で測定し、“185 nm放射の気中減衰特性”で換算している。<sup>2)</sup>

3. 7. 3 放射測定上の問題点

(1) 254 nm

受光器メーカーによって測定値が異なる。

(2) 185 nm

長尺ランプを放射測定する際、光源の寸法が大きいので窒素パージができない。

(3) 185 nm

(2)と同様の理由でセンサの入射角特性の測定ができない。

[東芝ライテック(株) 吉川和彦]

参考文献

1) 戸沢 均：UV測定機器の動向、照学誌、77-3、p.124-127(1993)

2) 中川、大谷、原、勝部、谷治、安達、相原：紫外185 nm放射の測定、照学誌、72-6、p.319-323(1988)

### 3.8 紫外から真空紫外光検出用光センサとパワーメータへの応用

各種産業、科学分野において、紫外（UV）から真空紫外域（VUV）の光応用が広がりつつある。この領域では、強力、安定な光源の開発と共に、安定かつ標準化された光センサの開発が強く望まれている。

ここでは、UVからVUV領域用を目的として、特に新規に開発された光センサ及び、それを内蔵したパワーメータについて述べる。

#### 3.8.1 序

紫外（UV）から真空紫外（VUV）領域において、光表面改質、光洗浄、半導体リソグラフィ、光加工などの分野に光化が進んでいる。この応用においては、強力かつ安定な光源と共に、安定、小型な標準光センサの開発が望まれている。

UVからVUV領域における標準用光センサとしては、以下の性能を持つことが求められている。

- ①. 高感度、かつ必要とする波長帯だけに感度をもつこと。
- ②. 長期にわたって安定に動作すること。
- ③. 小型かつ薄型構造であること。
- ④. 入射角度特性の広いこと。

一般的にはこの領域での光センサとしては、光電管、フォトダイオードが使われてきたが、前者は構造的に大型であり、後者において必要以上の長波長域で感度を有するなどの欠点があった。さらに、UVからVUV光による光センサの性能劣化、特に干渉フィルタと併用した場合のフィルタの劣化は大きな問題である。

今回上記の特性要求を満たす光センサが開発され、パワーメータへ実用化されたので以下に詳細を述べる。

#### 3.8.2 光センサ

特にここでは、波長選択上汎用される干渉フィルタなどを用いない（フィルタレス）光センサの開発を行った。以下開発した光センサの性能について述べる。

##### 1. 構造

図1に開発した光センサの構造を示す。

基本的には、カソード（光電面）、アノード、からなる二極管（光電管）である。

形状的には、実用面での装置装着時の要請上及び入射角特性を良くするために、小型かつ超薄型構造にすることが必要であった。

リモートプロセスの導入により、光電面を近接型構造化ができ、角度特性が広がり（後述）かつ低電圧動作（ $V_{cc} : 5V$ ）も可能となった。側管はセラミックで作られ、窓材が直接融着され、外囲器はTO8カン構造となっている。小型パッケージの使用、微細セラミック加工、リモートプロセッシングなどの技術の集成によりこれまでになく薄型のものが開発された。

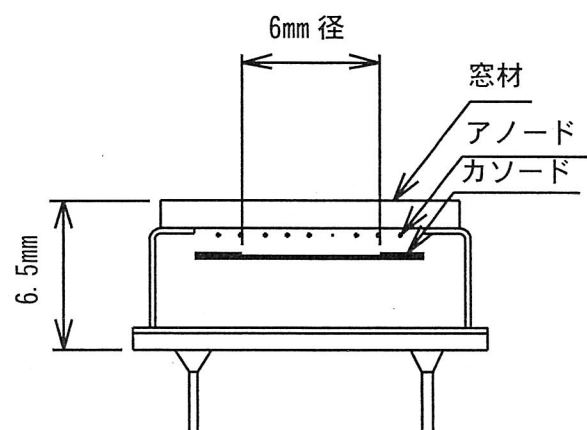


図1. 光センサの構造

##### 2. 分光特性

ここでは、フィルタレス型をめざし、UVからVUV領域にかけて狭帯域な分光特性をもつ光センサの開発を目指した。

光センサの分光感度は、短波長側は入射窓材の吸収波長で決まり、長波長側は光電変換面のバンドギャップによって制限された分布となる。紫外域での入射窓材としては、コバルガラス（吸収波長：290nm）、オゾンレス石英（吸収波長：210nm）、石英（吸収波長：160nm）、 $MgF_2$ （吸収波長：105nm）などが実用化されている。光電面としてはバンドギャップの大きいパゲン化物、純金属、 $Cs-Te$ 、から近年 $GaN$ 、ダイヤモンド薄膜なども開発された。

図2に今回実用化した各種の窓材と、光電放出材との組合せによる光センサの分光特性を示す。表1に、UVからVUVでよく使われる光源と対応する光センサの一覧表を示す。

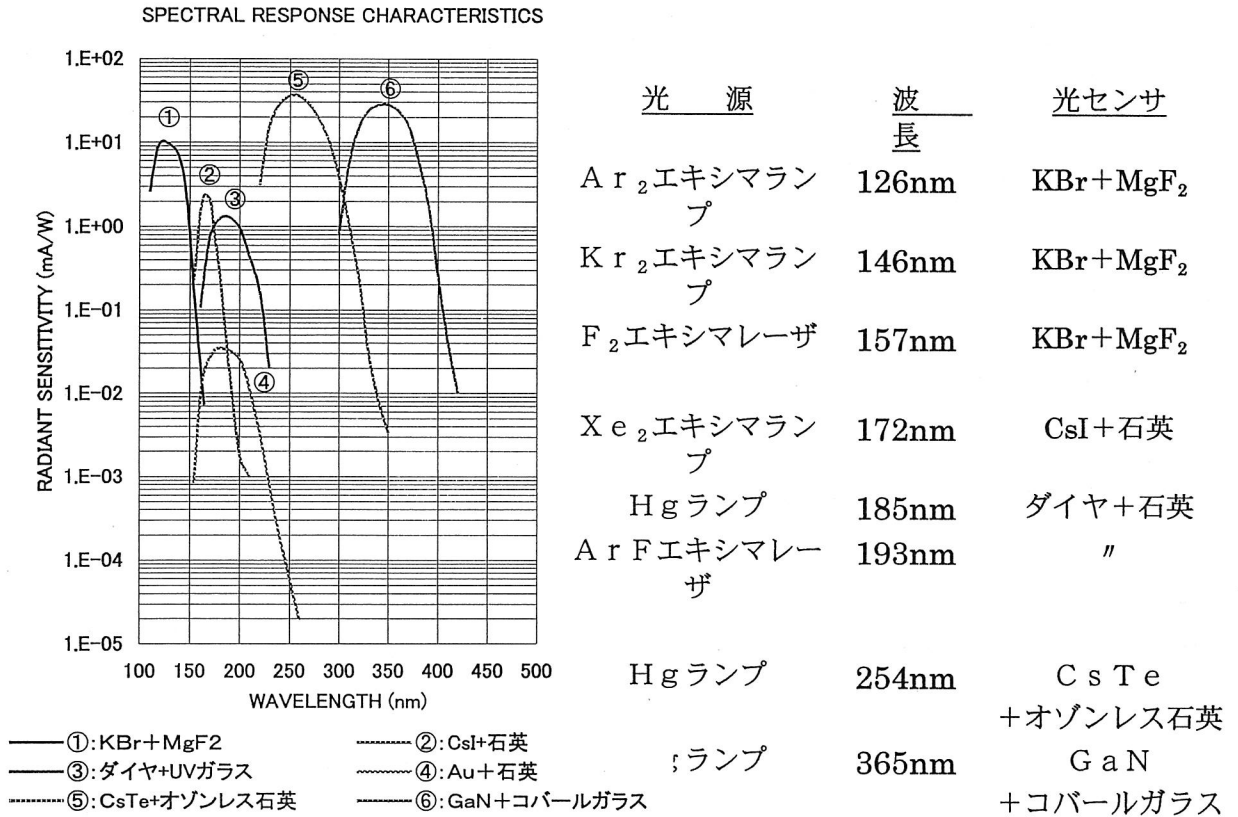


表1. 光源と対応する光センサ

図2. 光センサの分光特性

特に、低圧水銀灯のように、185nmと254nmの輝線が同時に発光する場合、今回のようなフィルタレスな光センサを用いれば干渉フィルタが不要となる。

### 3. その他の特性

紫外線に対する劣化試験はこれまでのところ数10mW/cm<sup>2</sup>入力で500時間までの安定動作が確認された。現在さらに強い光量、長時間での試験を継続中である。

#### 3. 8. 3 パワーメータへの応用

UVからVUV領域でのパワーメータとしては以上の性能が求められている。

- ①長期にわたり安定、かつ再現性よく動作すること。
- ②センサ部の標準値付けが精度よく出来ていること。
- ③小型、特に薄膜構造であること。
- ④入射角特性が十分広いこと。

⑤紫外線に対する劣化の少ないこと。

これらの要求事項を満たすパワーメータの開発を行い、実用化した。

以下に、前述の光センサを内蔵したパワーメータの構成、構造、性能等について述べる。

## 1. 構成

図3にパワーメータの構成図を示す。

ヘッド部と本体（CPU、LCD）から構成され、本体とパソコンとは、RS-232Cによってデータ通信が可能である。

ヘッド部には、前述の光センサが内蔵され、アナログ増巾器とセンサの感度校正データを記録するROMなども同時に内蔵される。本体は、制御信号の発生（CPU）、表示（LCD）部からなり、データ転送は、RS-232Cにて、パソコンと通信可能である。図4に、実際の製品の写真を示す。

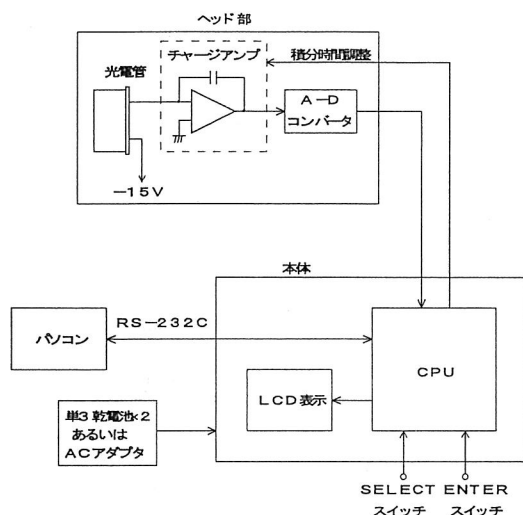


図3. パワーメータの構成



図4. パワーメータの外観写真

## 2. 性能、仕様

前述の表1には、各種光源と対応する光センサを示したが、今回は、低圧水銀ランプ、エキシマランプの計測用のパワーメータを実用化した。

表2に、その性能、仕様について示す。光センサは3種類あり、それぞれ254、185、172nmの波長に対応する。

項目	HUV172	HUV185	HUV254	単位
絶対値校正波長	172	185	254	nm
対象光源	エキシマランプ	低圧水銀ランプ	低圧水銀ランプ	
受光面サイズ	φ6			mm
動作温度範囲	0～+45			℃
照射光量測定範囲	照射光量【100 nW/cm <sup>2</sup> ～100 mW/cm <sup>2</sup> 】 積算光量【1 nJ/cm <sup>2</sup> ～12 J/cm <sup>2</sup> 】			
積算時間設定	【1・10・30秒、1・2分】固定切替式			
外形寸法	55×75×18			mm
重量	約160			g

表2-1 パワーメータの仕様（センサヘッド部）

項目	値	単位
表示	液晶デジタル表示 【照射光量(mW/cm <sup>2</sup> ) 積算光量(mJ/cm <sup>2</sup> ) : 有効 4桁】	
機能	【リアルタイムモード/積算モード】※オートレンジ切替	
外部インターフェース	RS232C	
電源	単三乾電池 2本、専用 ACアダプタ付属	
外形寸法	90×160×33	mm
重量	約 280	g

表 2-2. パワーメータの仕様 (本体)

図 5 に、本体部、センサヘッド部の寸法図を示す。センサヘッドは、18mm 厚という極薄構造が達成された。これは、使用環境上有利であるだけでなく、入射角分布を広げる上でも効果的であった。

図 6 に、本パワーメータの入射角に対する特性を示す。これまでのものに比べ大巾に改善され、ほぼ余弦分布に近い特性が得られた。

さらに、強い紫外線に照射されることを考慮し、センサヘッドのケースは金属で作られ、ケーブルは耐紫外線処理の施されたものを用いた。

外形寸法図 (単位: mm)

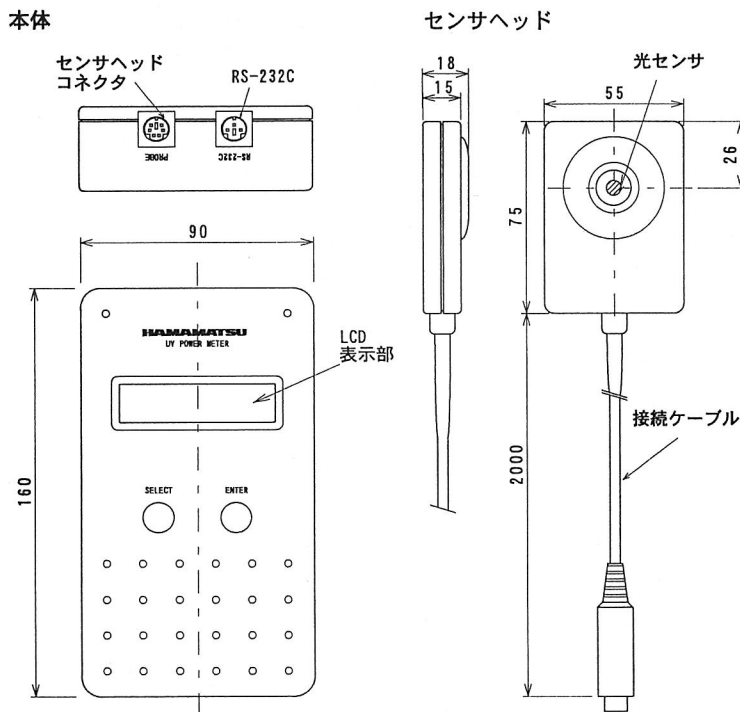


図 5. パワーメータの形状寸法

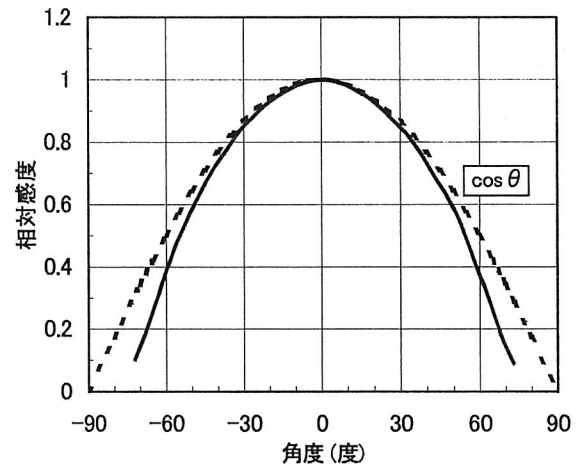


図 6. 入射角度特性

### 3. 8. 4 あとがき

今回開発した、UVからVUV領域用の光センサ及びパワーメータについて述べた。

今後ここで述べた光センサ、パワーメータが、UVからVUVの領域での光の標準を進める上で有効な手段となることを期待する。

[浜松ホトニクス (株) 久米 英浩]

### 3. 9 低圧水銀ランプを使用した紫外線照射装置の現場報告

#### 3. 9. 1 はじめに

短波長 UV（紫外放射）を効率よく放射する低圧水銀ランプの一つは、1938年に蛍光ランプとして市場に現われ、現在は照明ランプの主役の一翼を担っているが、蛍光ランプの兄弟の UV 光源としての低圧水銀ランプは、短波長 UV の作用効果の高さにもかかわらず、ランプの性能が低く（例：殺菌ランプ）適用できる応用分野も狭かったため、最近までマイナーな地位に止まっていた。

しかし、集積度の高い微細加工を要する先端技術製品の増大や、多種多様な新素材の開発、及びそれらの環境への排出の増加に伴い（難分解性有機化合物）、低圧水銀ランプの応用分野が急速に拡大している。さらに最近ではエキシマランプが加わり、短波長 UV の応用分野への関心は益々高くなっている。

低圧水銀ランプを使う時、UV の効果の評価や工程の管理のため、2本の共鳴線（254nm 放射、185nm 放射）の放射測定が不可欠であるが、両共鳴線（特に 185nm 放射）の測定技術或いは機器の現状は不確実、不十分の限りである。そのため過去の短波長 UV に係わる研究成果の信頼性は損なわれ、現場における管理も難渋しており、市場ではこの分野の専門家による確実で有効な計測技術及び機器の開発が待たれている。

#### 3. 9. 2 185nm 放射の応用市場

##### 3. 9. 2. 1 当社の市場データ

1997年当時の資料<sup>1)</sup>にも光放射源の種類の中に低圧水銀ランプは取上げられているが、それには括弧して殺菌ランプと追記されている。これが当時の照明学会が低圧水銀ランプにあたえていた地位だと思われる。その後、応用分野の拡大、市場規模の増大もあり最近では低圧水銀ランプも照明学会で認知されてきた。

当社が取扱う 185nm 放射の応用分野は7項目あり、この中から光表面改質、光洗浄、光アッシング・エッチング、光 CVD の4項目の年間売上の推移を、図1に示す。当社一社のデータで金額もまだ少ないが、殆どゼロから始まり、急速に成長している。現在では新規参入もあり、又、エキシマランプも市販されている書籍で紹介される程認知されてきたので、97年当時の2倍以上に市場規模は増大していると推測される。

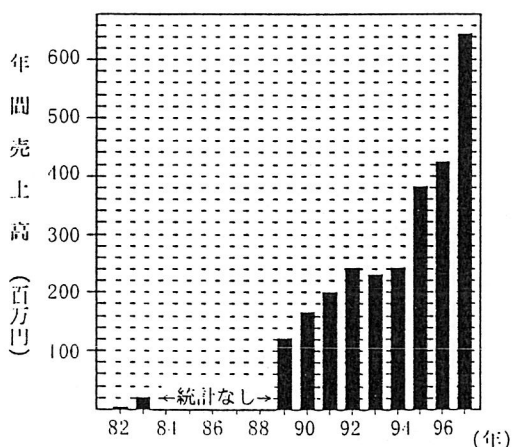


図1 光表面処理装置の年間売上高の推移

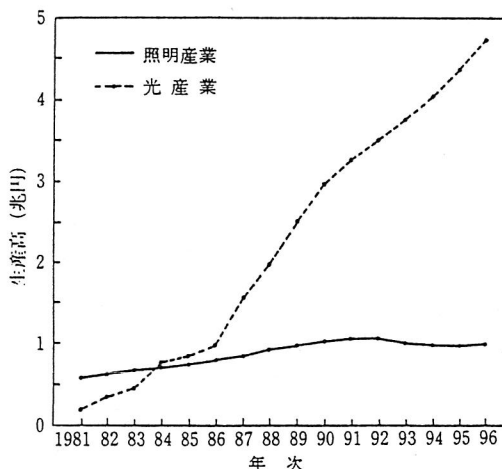


図2 我国における照明産業と光産業の生産高の推移

### 3. 9. 2. 2 光産業の成長

同じように殆どゼロから始まり、短期間に成長して老舗の照明産業の市場を凌駕した市場に“光産業”がある。その成長カーブ図<sup>2)</sup>と当社の光表面処理装置の成長カーブを比較すると興味深い共通点が見つかる。

第一に勃興時期が近く、成長度合いも似ている。“はじめに”の項で述べたように、先端技術製品の増大や多種多様な新素材の開発に、殺菌ランプではない低圧水銀ランプの応用製品の需要が、光産業の成長に依存している事がカーブの比較から見える。

### 3. 9. 2. 3 他の 185nm 放射の応用分野

水処理の分野でも 185nm 放射の応用分野が生まれており、将来が期待されている。有機性汚濁物の浄化（スイミングプール、公衆トイレの水、etc）や除鉄、除マンガンへの応用には当社も実績がある。トリハロメタン等の難分解性有機化合物には特に有効で、最近もダイオキシンの除去に実績ができた。

オゾンを生成して環境衛生分野で活用する製品もある。当社はこれらの分野は表面処理に負けない有望な市場と見ている。

### 3. 9. 3 254nm 放射と 185nm 放射の測定

#### 3. 9. 3. 1 254nm 放射の測定経緯の概要

光洗浄装置等で低圧水銀ランプを使用する場合の最大の特徴は W 数が大きく（65W～1KW）、近距離（10mm～50mm）で照射することである。

当社では当初 254nm 放射の測定は T 社製の照度計を使用していた。現在は自社ブランド品も含めて、数社の照度計を使っている。当時はユーザーも照度が相対値、しかも各社バラバラで基準がないことを説明して納得してもらうのに苦労した。現在ではユーザーの理解が進んで何処の照度計で何  $\text{mw}/\text{cm}^2$  必要か話は早くなっているが、信頼性の状況は変わっていない。

当社でも 90 年より照度計を OEM で入手して、自社ブランドで販売している。値付けをする際、他社の照度計を調査すると、最大で 4 倍感度が違うことがわかり中心値をねらった。又、距離によって感度比が変化することもわかり、近距離を正確に測定できる照度計の必要性も感じている。

現在では 254nm 放射の標準光源・検出器による測定方法も確率され、1999 年には照度測定値の国内相互比較も行われた。<sup>3)</sup>しかし、依然として 254nm 放射照度目盛のはずれ幅は解消されておらず、市場での信頼性は低い。早急に認定を受けた機関による定期的な値付けや供給ができる体制を確立することが望まれる。

#### 3. 9. 3. 2 185nm 放射の測定経緯の概要

当社では 1987 年に 185nm 用照度計を購入するまで、低圧水銀ランプの測定は 254nm 放射に限られていた。30 年程前にサルチル酸を用いて 185nm を測定したことはあるが、煩雑すぎてとても実用にならなかった。

初めて当社の低圧水銀ランプの減衰特性（185nm 放射と 254nm 放射の合成）が得られたのは、次亜塩素酸の分解速度法によるもので、測定は他社で行われた。結果を図 3<sup>3)</sup>に示す。185nm 放射と 254nm 放射を合わせた減衰特性として当社では今でも貴重な資料である。

1980 年代に入って光洗浄、光表面改質に低圧水銀ランプが使われるようになり、数社から 185nm 用照度計が販売された。当社でも 1987 年に購入しデータの蓄積を始めた。それまでは当社では 1960 年に発表されたアメリカの文献<sup>4)</sup>を参考にして、185nm 放射の比率は 254nm 放射の約 20%と称してきた。各社が発表する値も数%～30%とバラツキが大きく全く信頼できなかった。

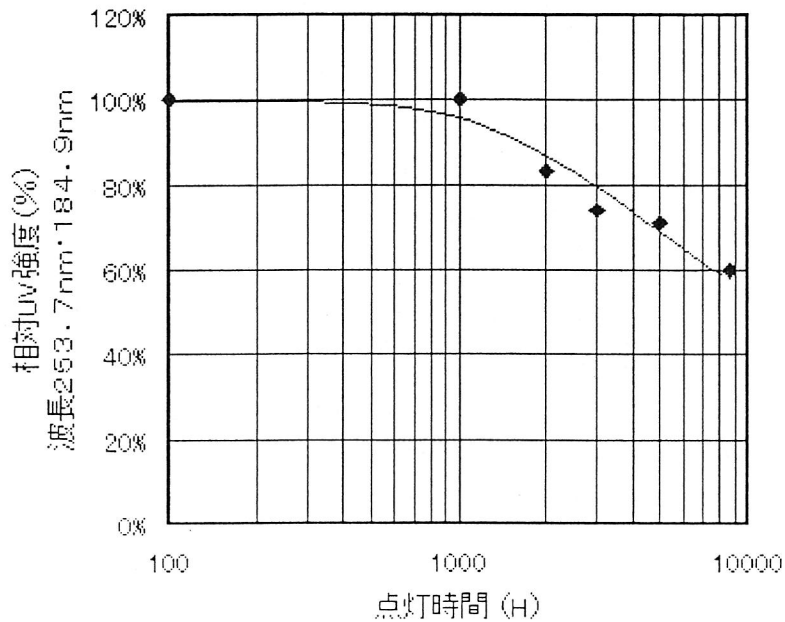


図3 UV強度動程特性

当時、当社で測定すると合成石英製の低圧水銀ランプで185nm放射の比率は254nm放射の約6%の値を得た。<sup>5)</sup>しかし、その後校正に出すと感度が数倍になって返ってきた。これは当社所有のものだけでなく、別のメーカーの製品も同じ状況であるとの声がユーザーから届いており、その後販売中止になった。

したがって、185nm放射については減衰特性等の管理の上で重要なデータが発表されていない。これは185nm放射の有効な標準光源がないことが原因である。照明学会では研究調査委員会が150nm～200nmの標準光源・検出器による測定法の確率を目指し活動中と聞いているので期待している。

### 3.9.4 おわりに

短波長UVの応用分野が急速に拡大していく中で、評価、管理には正確で信頼性のある絶対値の測定が不可欠である。254nm放射については測定方法が確立され、供給体制作りの段階に入っているので早急に体制を作り、各社のはずれ幅を解消することが課題となる。

185nm放射については、測定方法の確立と信頼性のある機器の開発が待たれる。

[石黒省三・セン特殊光源(株)]

### 参考文献

- 1) 河本 康太郎：「最近の光放射応用技術と光源の動向」, 照学誌, 81-7, 1997.
- 2) 大久保, 中川, 佐藤, 河本, 干場, 戸沢：「253.7nm放射照度の国内比較」, 照学誌, 83-2, 1999.
- 3) 広瀬, 千田：「高出力低圧水銀ランプ」東レ中研社内報告書, BO12, 1978/1/17
- 4) Bentrey T. Barnes：「Intensity of 1850 and 2537 in Low-Pressure Mercury Vaper Lamps with Rare Gas Present」 Jour. Of Appl. Physics, 31, 5, May, 1960.
- 5) 菊池 清：「短波長紫外放射光源としての低圧水銀ランプ」, 塗装工学, 27-4, 1992.

### 3. 1 0 エキシマレーザーの光出力の測定

#### 3.10.1 エキシマレーザーの出射光の特徴

レーザー光を用いて加工する技術は産業界で広く用いられてきており、厚い鉄板の切断から薄いアルミニウム板の溶接まで応用の場は非常に広がってきている。ここで取り上げるエキシマレーザーは紫外領域の加工用としては唯一実用化されているレーザーであり、最近では近視の治療用、集積回路のリソグラフ用、液晶の a-Si を p-Si に変性するアニーリング用などで用いられよく知られてきている。

一般にレーザー光（コヒーレント光）は、通常の光（インコヒーレント光）よりも指向性がよく、強度も格段に高い。さらにエキシマレーザーは、パルス発振（持続時間；10～20 nsec）であるためこの時間内での瞬間的なパワー密度は 10MW/cm<sup>2</sup> を超える（表 1）。短時間に大きなエネルギーの集中していることが、後述するように精度の高い出力測定を妨げる一因となっている。

表 1 紫外放射源のパワー密度の比較

光源	波長(nm)	発振形態	出力	ピークパワー密度(W/cm <sup>2</sup> )
高圧 Hg ランプ	365	cw	1kW	1～10
N <sub>2</sub> レーザー	337	パルス(10ns)	10mJ	10 <sup>6</sup> ～10 <sup>7</sup>
エキシマレーザー(XeF)	351	パルス(20ns)	300mJ	～10 <sup>7</sup>
エキシマレーザー(XeCl)	308	パルス(30ns)	400mJ	10 <sup>7</sup> ～10 <sup>8</sup>
エキシマレーザー(KrF)	248	パルス(20ns)	600mJ	10 <sup>7</sup> ～10 <sup>8</sup>
エキシマレーザー(ArF)	193	パルス(10ns)	400mJ	10 <sup>7</sup> ～10 <sup>8</sup>

\*表中の値は典型例。cw は連続出力を示す。

#### 3.10.2 測定方法および測定機器

エキシマレーザーのようなパルスレーザーの（パルス当たり）出力エネルギーを測定する方法には

- ①パルス連続発振（例えば 200Hz）して平均出力（W）を測定し、発振周波数で除する。
- ②1パルスのみエネルギー（J）を測定する。

があるが、一般に連続発振と単発発振ではレーザー内の温度平衡に差があり出力が異なることが多いため両方の方法で確認することが不可欠である。

測定用の機器としては測定する物理量により熱的方法と光電的方法がある（表 2）。光電的方法は通常のランプの光出力測定にも用いられ、各々の波長に応答するフォトダイオードが製造されており測定すべき波長を選ぶフィルターと組み合わせて出力を計る事ができる。しかし、レーザーの場合あまりにもパワーが大きすぎてこの方法ではフィルターやフォトダイオードがダメージを受け測定ができなくなる。また、レーザービームの断面内では出力分布（図 1）があるため、フォトダイオードの小さな受光面では一部のみしか取り込め

ず、精度の良い測定はできない。従って、測定は熱量の測定によらざるを得ない。

表2 測定原理と測定器

測定量	原理	測定器	特徴	測定方法	問題点
熱量測定	サーモパイル (熱起電力)	サマルティースク	・広波長応答	①	・光→熱変換効率 ・環境温度
		サーモパイル	・波長依存性小	①	
	パイロエレクトリック (焦電効果)	パイロエレクトリック	・応答性遅い ・高耐力	②	
光電測定	光起電力	フォトダイオード (Si, Ge 等)	・狭波長応答 ・波長依存性大 ・高速応答性 ・高感度	②	・光→電変換効率 ・耐力が低い ・波長依存性

サーモパイル測定器は応答性が最も遅いので連続発振の時の平均出力を測定するパワーメータとして、パイロエレクトリック測定器はパルスエネルギーを測定するエネルギーメータとして使用されている。

各測定器ともメーカーによってかなりばらつきがあり、また使用時間によりレーザーダメージの影響があるが、基準器を設定して各測定器の相互比較をおこなった。

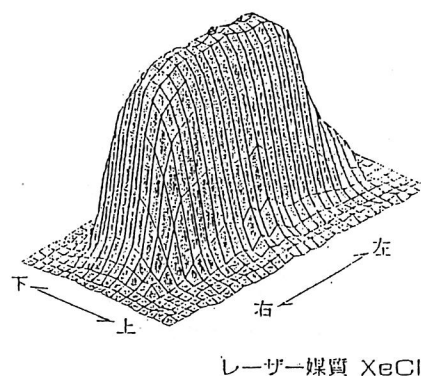


図1 レーザービーム断面の出力分布

### 3.10.3 測定器の較正

使用した測定器は

エネルギーメータ；GENTEC 社製 ED-500(No1, No2, No3), ED-200(基準器)

パワーメータ；OPHIR 社製 FL150A-EX-RP, SCIENTEC 社製 5003/1010。

基準器は何らかの形で較正されているものとしこれに対して各々の測定器の変換係数を決定する。(測定器の出力は電圧であるので、変換係数によりエネルギーに読み替える。) 実験配置を図2に示すが、これに対して次の手順で較正を行う。

(1) 合成石英基板(スプリッター)の透過率Tと反射率Rの比T/Rの測定

①M1に測定器1、M2に測定器2を置きエネルギー値を多数回測定して

$V_T/V_R$ の平均を求める(M1、M2は基準器である必要はない)。

②M1とM2を入替え同様に $V_T'/V_R'$ を求める('は位置を交換したことを示す)。

③比T/Rを計算する。 $T/R = \text{SQRT}((V_T/V_R) \cdot (V_T'/V_R'))$

(2) エネルギーメータの較正

M1に基準器、M2に較正対象測定器を置いて多数回測定し較正する。

$$K_2 = \sqrt{(V_T / V_R) / (V_T' / V_R')} \times K_1$$

(3) パワーメータの較正

同様にM1に基準器、M2に較正対象測定器を置いて多数回測定し較正する。

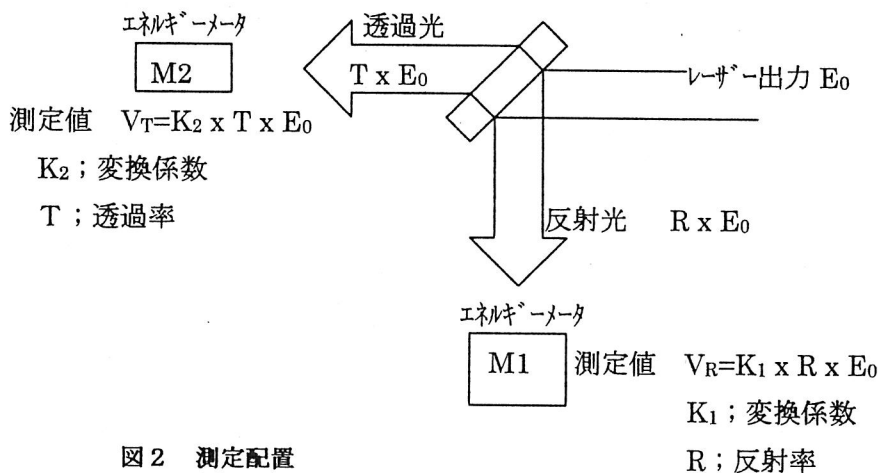


図2 測定配置

3.10.4 結果と問題点のまとめ

得られた結果を表3に示し、問題点を列挙する。

表3 変換係数の測定値

測定器の種別	測定器	変換係数	備考
エネルギーメータ	ED200 (基準)	10.47	
	ED500(No1)	1.91	] 差は 10%程度
	ED500(No2)	1.91	
	ED500(No3)	2.08	
パワーメータ	OPHIR	1.046	] 20%近い差がある
	SCIENTEC	0.855	

相対比較の方法と結果について報告したが、最終的には基準器の較正方法が確立されねばならない。今回の測定の誤差要因、基準器較正時の問題点についてまとめると次の様になる。

- ①測定器にビームが入射したとき、発光する。(他の波長に変換されてロスする。)
- ②測定器にビームが入射したとき、音を発生する。(振動エネルギーとしてのロス。)
- ③測定器にビームが入射したとき、表面の状態が変化する。(ダメージと飛散物質によるエネルギーロス)。
- ④環境温度、風向きが変化すると(特にサーモパイルの)熱拡散が変化し出力が変化する。
- ⑤光→熱の変換効率の不確実性。

(日本電池 金森佳憲)

### 3.11 低圧水銀ランプの応用と課題

#### 3.11.1 UV/O<sub>3</sub> プロセスの特徴

低圧水銀ランプからの紫外放射を利用したプロセスとして UV/O<sub>3</sub> 処理がある。これは紫外放射の化学結合切断作用とオゾンの光分解により発生する活性酸素との相互作用を利用したものでその作用として以下のものが知られている。

- 1) 材料表面の親水化
- 2) 材料の表面改質
- 3) レジスト等有機化合物の分解、除去
- 4) 酸化膜の形成

親水化作用はガラス等無機材料に特に有効で厚さ数 10 Å 程度の有機物被膜が付着したものについては 60 秒以下の処理で純水の接触角を 5° 以下にすることが可能である。プラスチックは無機材料に比べ時間を要し、また PP、PE、フッ素樹脂等親水化不可能なものもある。(図 1)

レジストの分解、除去(灰化)は実用的な剥離速度を得るには熱、高濃度オゾン等のアシストを要するプロセスであり、KrF 用ポジレジストを例にとると 7% のオゾン雰囲気、250°C で 1 μ m/min、300°C で 1.5 μ m/min 程度の剥離速度が得られる。また、水、NO<sub>x</sub> 等の微量添加による剥離速度の向上も知られている。

また、最近注目されているプロセスとして半導体の絶縁膜の改質、形成がある。次世代 DRAM のキャパシタ絶縁膜とされる Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> は CVD 形成されたものはリーク電流が多いが UV/O<sub>3</sub> 処理と酸素アニールの組み合わせで実用レベルまで低減される。<sup>1)</sup>

Si の処理では、7% オゾン雰囲気において 500°C の UV/O<sub>3</sub> 処理により 30 分で 20 Å の Si 酸化膜が形成される。(図 2) 他にも高誘電率ゲート酸化膜の候補として挙

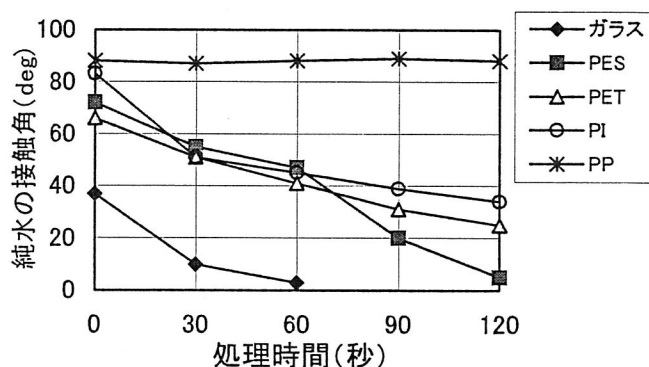


図 1 各種材料の親水化

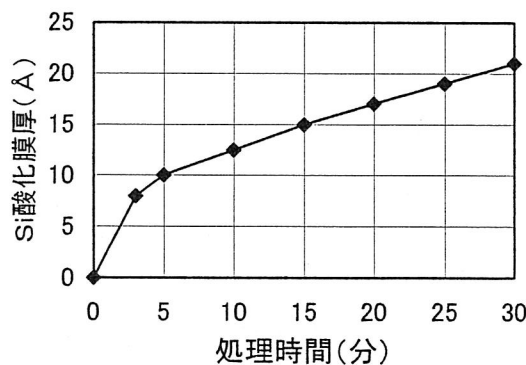


図 2 Si酸化膜の成長

げられている Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の形成も期待でき、データの蓄積が必要となっている。

### 3.11.2 UV/O<sub>3</sub>プロセスの応用例

表 1 に現在実用化されている応用例を示す。高潔浄度、ドライ化の要求が高い半導体、LCD 製造分野への適用が主であり中でもインライン化可能な点を生かし LCD 製造への導入が最も進んでおり、以下そこでの応用例を述べる。

#### 1) 洗浄プロセス

基板を親水化し後工程のウエット洗浄におけるパーティクル除去効率の向上を目的としたもので数 10～200ppm のオゾン雰囲気中で 600mJ/cm<sup>2</sup> 程度の光量で処理を行なう。

#### 2) レジストプロセス

レジストコーティング前に洗浄プロセスと同様の条件で処理を行ない、レジストのはじき、ピンホール等を防止する。また、パターンニング後の現像残さ（数 100 Å）除去が有り、数 100～数 1000ppm のオゾン雰囲気中で 150℃前後で処理が行なわれる。

表 1. UV/O<sub>3</sub>処理の実用例

分類	目的	対象	処理時間	効果
洗浄 補助	有機汚染膜 の除去、親 水化	STN,TFT 基板	20～30 秒	ウエット洗浄時間短縮 フォトレジスト削減、塗膜性向上
		カラーフィルタ基板		
		マスク	20～30 秒	ウエット洗浄時間短縮
		ガラス、金属	5～10 分	接着力向上
		リードフレーム	45 秒	モールド密着性向上 ワイヤボンディング力向上
改質	親水化	プラスチック	5～10 分	接着力向上
	フォトレジ スト除去	Si ウエハ	1～5 分	低ダメージ
	現像残さ除 去	カラーフィルタ基板	1～2 分	シール強度、ITO 密着性向上

### 3.11.3 課題

現在、1)低圧水銀ランプや装置のコスト削減、2)対象物の大型化対応、3)長寿命化、4)172nm 放射エキシマランプ<sup>2)</sup>への対応等の課題がある。

エキシマランプに関してはプロセスの改良(例えば酸素雰囲気中処理 図3)、長寿命化(従来の4倍の寿命を持つものが市場に出ている)等によるランニングコストの競争が鍵になると考えられる。また、半導体分野においても新規プロセスへの対応とともに、より厳しくなる高洗浄度化、高性能化(処理能力、均斉度等)に応じた装置としての完成度の高まりが必要である。

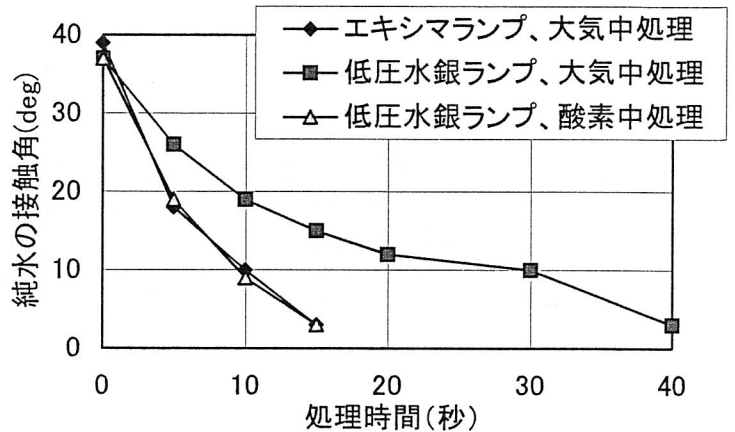


図1 ガラスの親水化比較

### 3.11.4 終わりに

UV/O<sub>3</sub>処理が本格的に使用され始め10数年が経過したがその作用、効果、可能性について未だ未知の点が多い。このあたりはユーザのノウハウに関わる場所が多く、今後ともユーザの協力を仰ぎ研究、開発に臨む所存である。

### 参考文献

- 1) 神力 博、応用物理、第60巻、第11号、p.1115-1118(1991)
- 2) 磯 慎一 他、照明学会誌、第83巻、第5号、p.273-277(1999)

(日本電池 細谷浩二)

### 3. 12 エキシマランプの実用状況と放射測定の実際

#### 3. 12. 1 エキシマランプの構造

図1に示すように大小の石英管（誘電体）で放電空間を形成し、その放電空間には所定圧力の放電気体が充填される。内側管の内壁に金属電極を外側管の外壁には金属網電極が配置されている。内外両電極に高周波高電圧が印加され、放電空間に発生した放電プラズマが放電気体を励起し、エキシマ発光させる。金属網電極の網目を通してエキシマ光が放出する。

同様の構造で、ランプ軸の一方の端面に窓を取り付けたタイプがヘッドオン型である。図2に概略構造を示す。上述の外管側面から光を取出すタイプに比べて数倍の強さの放射強度が得られる。

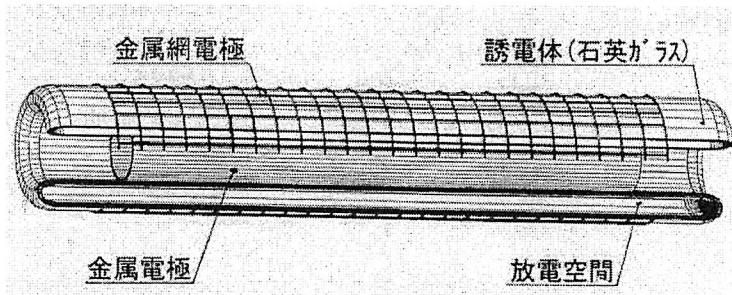


図1 エキシマランプの概略構造

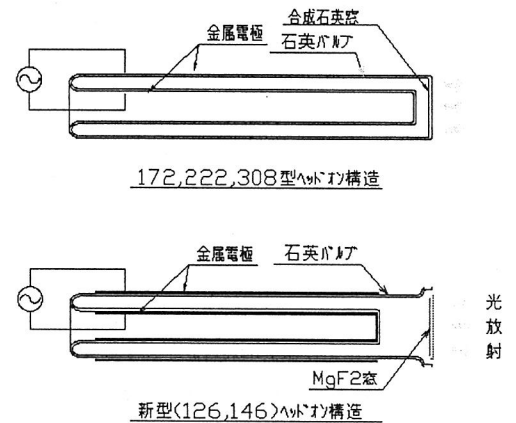


図2 ヘッドオン型ランプの概略構造

#### 3. 12. 2 エキシマランプを搭載した平面光源

エキシマランプを搭載して172nmエキシマ光を照射できる平面光源について概説する。

基本構造を図3に、610mm×690mmの窓を持つ照射装置を写真1に示す。金属ブロックに設けた複数本の円筒溝にエキシマランプを固定する。金属ブロックは水冷できるように冷却水の流路を備えており、ランプは金属ブロックを介して水冷される。ランプとランプの間には山形のミラーが設けてあり、窓面の放射照度分布を均一にすると同時に光を有効に取出す働きをしている。ランプ、金属ブロック、山形ミラーは外気と隔離するため金属容器内に収められ、容器内はエキシマ光の吸収の少ない気体(窒素等)で満たされている。ランプ前面にはエキシマ光を効率良く透過する窓ガラス(合成石英)が設けてあり、窓ガラスよりエキシマ光が照射される。

金属ブロックをグランド電位、ランプ内管の金属電極を高圧電位として高周波高電圧が給電されてランプが点灯する。

以上のような構成で製作した窓面積610mm×690mmを持った平面光源は総出力約46Wの172nmエキシマ光を取り出すことができる。窓面における放射照度分布のバラツキは±10%程度である。

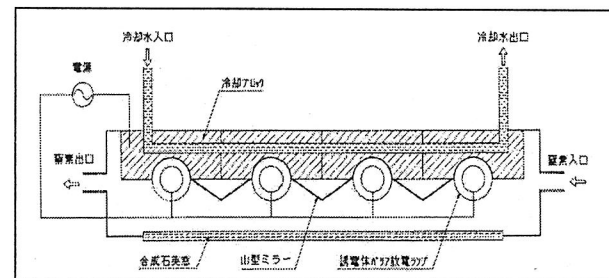


図3 エキシマランプを搭載した平面光源構造図

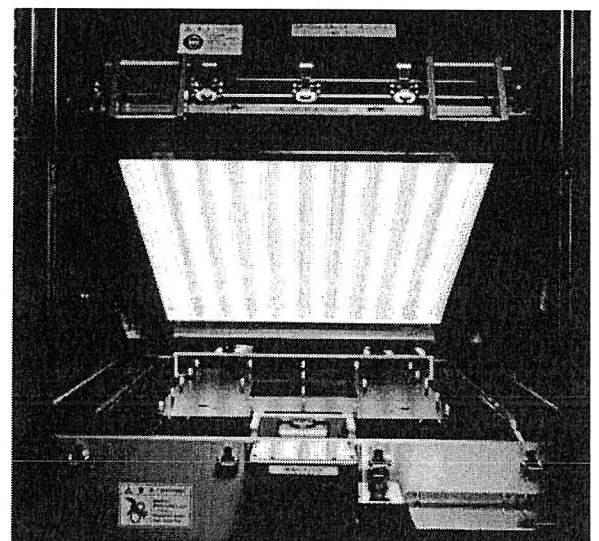


写真1 610mm×690mm 平面光源

### 3. 1 2. 3 エキシマランプの用途紹介

エキシマランプの用途例について紹介する。

- ・  $Ar_2^*$ エキシマランプ 126 nm (半値幅 10 nm)  
真空中の微量水分の測定<sup>1)</sup>、光CVD用光源
- ・  $Kr_2^*$ エキシマランプ 146 nm (半値幅 13 nm)  
蛍光体の特性評価<sup>2)</sup>、アルコイト<sup>®</sup>からの  $SiO_2$ の形成<sup>3)</sup>、光CVD用光源
- ・  $Xe_2^*$ エキシマランプ 172 nm (半値幅 14 nm)  
蛍光体の特性評価<sup>2)</sup>、VUV/ $O_3$ ドライ洗浄<sup>4)</sup>、真空中における脱ガス<sup>5)</sup>、フォトエッチング<sup>6)</sup>、プラスチックの表面改質<sup>7)</sup>、光CVD用光源
- ・  $KrCl^*$ エキシマランプ 222 nm (半値幅 2 nm)  
PDP用蛍光体の評価、ダイヤモンドの結晶性解析
- ・  $XeCl^*$ エキシマランプ 308 nm (半値幅 2 nm)  
UVキュア<sup>8)</sup>

### 3. 1 2. 4 真空紫外エキシマ放射の測定

真空紫外光用の照度測定器は一般に市販されていない。そこで我々は独自に製作した真空紫外光用モニターを用い、 $Ar_2^*$ 、 $Kr_2^*$ 、 $Xe_2^*$ エキシマランプ(126 nm, 146 nm, 172 nm)の放射照度の特性測定を行った。

#### ①放射照度モニターの構造

合成石英ガラスに蛍光体(126 nm, 146 nm, 172 nmに感度を持っている)を塗布し、真空紫外放射を蛍光体で可視光に変換して可視光の強度をシリコンフォトダイオードで測定した。 $Ar_2^*$ エキシマ光(126 nm)、 $Kr_2^*$ エキシマ光(146 nm)の場合は、合成石英ガラスを透過しないため、真空紫外放射が直接蛍光体を照射するよう塗布面を露出させた。

#### ②ヘッドオン型 $Ar_2^*$ 、 $Kr_2^*$ エキシマランプの放射照度分布測定

測定装置の概要を図4に示す。モニター前面に $\phi 1.5$ のアーチャーを配置している。

真空ポンプR.P.でチェンバー内を真空(約2 Pa)に排気した後窒素(純度99.999%以上)で満たし、測定中は約2 L/minの流量で窒素パージしている。

分布測定はモニターをランプ窓面より所定の距離に配置し、ランプ軸に垂直に移動させて行った。距離依存特性についてはランプ軸に配置したモニターを軸方向に移動させて測定した。

放射照度分布の測定結果を図5に示す。 $Ar_2^*$ 、 $Kr_2^*$ エキシマランプ共に同じ放射照度分布を示した。窓面外周部の放射照度が高くなっているのは、ランプ構造に由来する。中空ランプ構造であるため窓面中心の放射照度が低くなっている。

#### ③エキシマランプの分光分布の測定

ACTON社製真空紫外分光器(型式VM-502)を用いて $Ar_2^*$ 、 $Kr_2^*$ 、 $Xe_2^*$ エキシマ光の分光分布の測定を行った。比較のため、一般に市販されている30W重水素ランプの分光分布測定も同時に行った。結果を図6に示す。 $Ar_2^*$ エキシマランプ(126 nm)、 $Kr_2^*$ エキシマランプ(146 nm)、 $Xe_2^*$ エキシマランプ(172 nm)の重水素ランプに対する強度比は4 : 7 : 13であった。

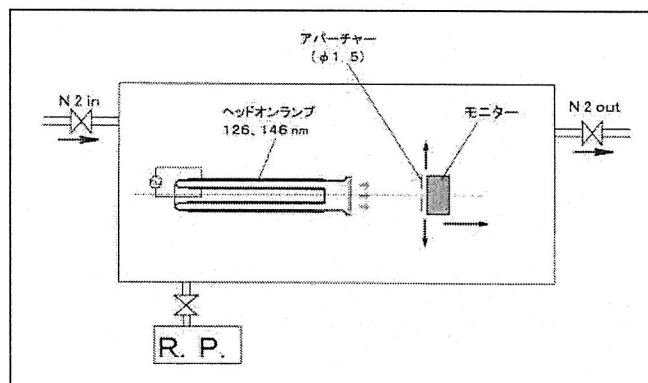


図4 放射照度分布測定の概要図

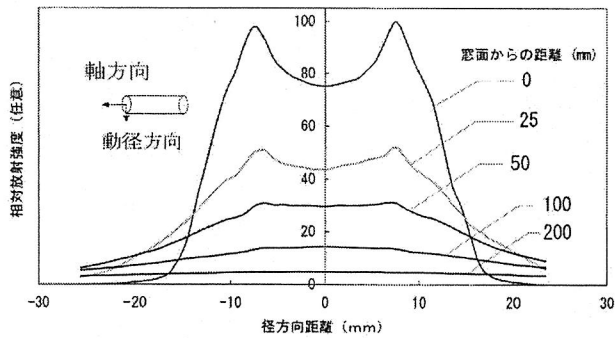


図5 ランプ窓面からの距離と動径方向の放射照度空間分布(窒素中)Ar<sub>2</sub>\* (126nm)

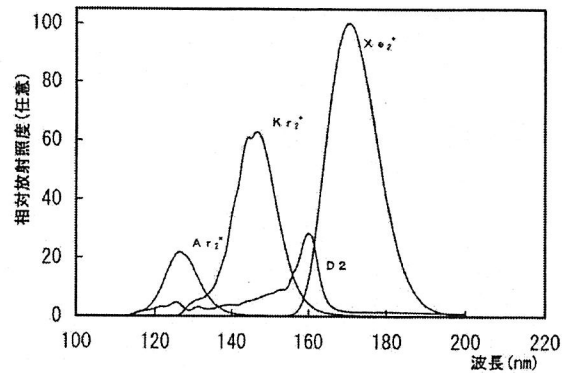


図6 Ar<sub>2</sub>\*, Kr<sub>2</sub>\*, Xe<sub>2</sub>\*とD<sub>2</sub>ランプの分光分布比較

④平面光源の窓面における照度分布の測定

Xe<sub>2</sub>\*エキシマランプ(172nm)を搭載した面光源の窓面における放射照度の分布測定を行った。

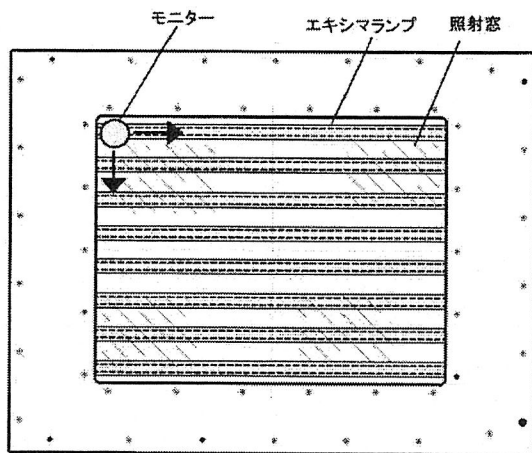


図7 窓面放射照度分布測定の概要

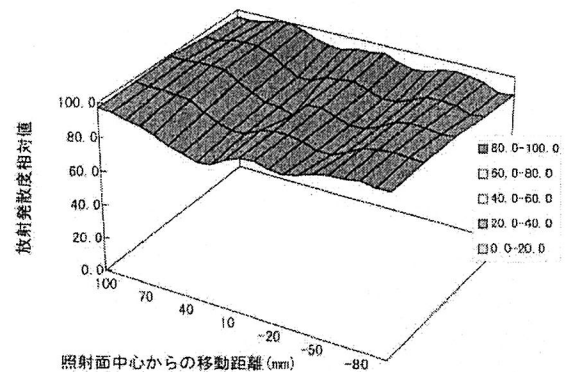


図8 窓開口230×230mm平面光源の窓面における放射照度分布

測定方法の概要を図7に示す。

230mm×230mmの開口窓を持つXe<sub>2</sub>\*エキシマ光平面光源の放射照度分布の測定結果を図8に示す。照度のバラツキは約±10%であった。放射照度が強くなっている部分はランプとランプの間である。放射照度分布を均一化するための山形ミラーの効果によるものである。

(ウシオ電機(株) 菱沼 宣是)

参考文献

- (1)北野 寛他：アルゴンエキシマランプを用いた蛍光法によるガス中微量水分の測定，1996年秋季第57回応物9a-ZA-3
- (2)吉岡 俊博他：真空紫外エキシマランプを用いたPDP用蛍光体評価，信学技報EID95-130,ED95-204,SDM95-244(1996-02)
- (3)栗津 浩一：エキシマランプ光励起による二酸化ケイ素膜のアルコキッドからの室温形成 NEW CERAMICS (1996 No.8)p47-52
- (4)磯 明典：600×750mm基板対応超小型洗浄装置，エレクトロニクス実装技術 1997. 7 (Vol.13 No.7)p27-30
- (5)豊間根 孝雄他：UV照射による石英ガラスのガス放出特性，平成7年度(第28回)照明学会

全国大会

- (6)竹添法隆他：エキシマランプによるフォトエッチング機構，春季第45回応物29a-G-6
- (7)村原 正隆：エキシマレーザーによるフッ素樹脂の光化学的 surface 改質(1)，ポリファイル(1997.Vol.34 No.398)p55-63
- (8)Angelika et al：Excimer UV-lamp-The real cold alternative in UV-curing，ラドテックシカゴ 1998 Apr.19-22

## 4. 埼玉大学における紫外・真空紫外領域での放射測定

### 4.1 概要

埼玉大学（工学部電気電子システム工学科電子計測研究室）では、未だ放射標準の確定していない、波長 250nm以下での放射測定を受光器（放射検出器）をもとにして実施する方針を立てて、1974年から今日までに波長 250nmから 160nmまでの放射源の分光放射照度、放射検出器の分光応答度の測定方法を検討して、実際の放射源（重水素ランプ）と放射検出器（シリコンフォトダイオード）に再現性のある校正値を値づけした。

また、それとともに波長 200nm以下の真空紫外域での大気及び窒素（99.999%）の放射吸収の状態（圧力パラメータ）を測定して、真空紫外測定に際しての測定環境を検討した。さらに、放射源を真空中で点灯したときの状態の変動（管温度、分光分布など）についても測定を行って、重水素ランプ、Xeランプなどの真空中での放射出力特性が大気中あるいは常圧に近い窒素中とはかなり異なることを確認した。

以下、これらの事項について記述する。

### 4.2 大気中での短波長紫外放射測定

#### 4.2.1 波長190～800nmでの放射検出器の分光応答度測定<sup>1) 2)</sup>

光放射の吸収熱による温度上昇を利用して光放射のパワーを測定する熱形放射検出器（サーモパイル、焦電形検出器など）は、よい吸収材（金黒など）が得られれば分光応答特性が広い波長範囲にわたって一定になるので、これを用いれば、放射源の標準が確立されていない波長域での放射測定が可能になる。しかし、熱形検出器は一般に応答速度が遅く、検出能力も余り高くないので、これを直接使用して4.2.2で述べるような測定系で分光放射測定を安定に行うことはかなり難しい。そこで、常用できる安定で検出能力の高いシリコンフォトダイオードなどの量子形検出器の分光応答度を熱形検出器で校正して、それを受光器（分光応答度）から放射源（分光放射照度）への値づけの基準とした。受光器分光応答度の校正精度はこの作業を開始した時期（1980年代始め）では、一般通念として放射源の分光分布測定に比べてかなり劣ると考えられていたが、その原因を追求した結果、誤差発生の主因が分光装置の出射単色光の均斉度の波長的な変動であり、それを解決するには入射の結像光学系の結像状態を波長に対して一定にすればよいことが分った<sup>3)</sup>ので、入射用に比較的大口径の凹面鏡を浅い反射角度で用いて、単色光出力の均斉度の波長的な変動を波長 200～800nmで 10%程度に押さえて、校正精度を放射源測定と同程度にできた。

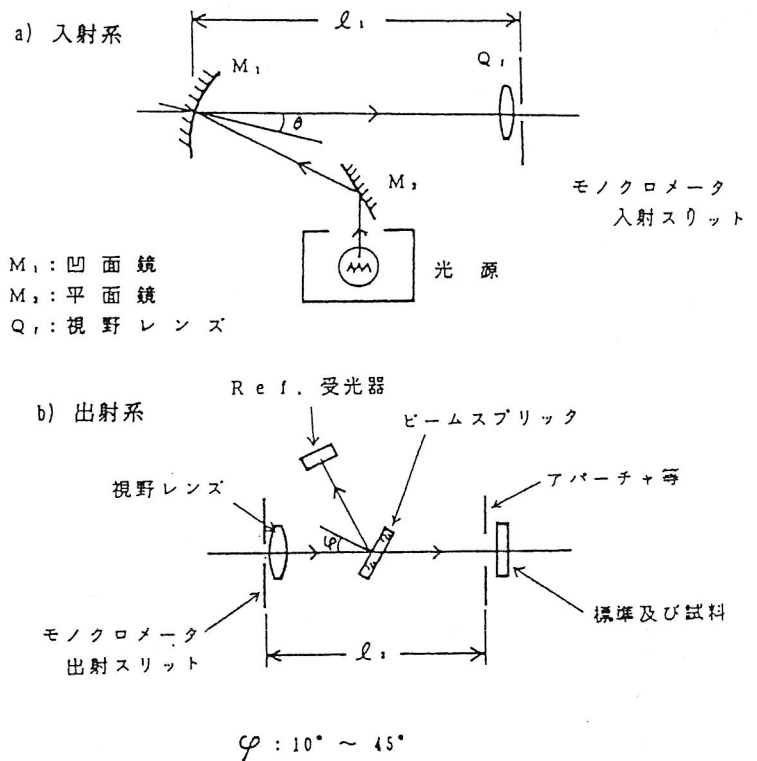


図 4.1 分光応答度測定の入射・出射光学系

分光装置（モノクロメータ）は NIKON G250（回折格子1200本/mm、ブレイズ波長250nm）である。熱形検出器はロックイン検出（交流動作）が可能な焦電形検出器（PVDF: ポリフッカビニリデン、金黒塗付）を用いて測定のス/N比の向上をはかった。入射用放射源はXeランプまたは重水素ランプ（水冷）を用い、短波長域で迷光除去のために、広帯域フィルタを併用し、Ref. 受光器を用いて置換測定して、波長 190nmまで十分安定で再現性のある結果を得ることができた。光学系及び測定結果の例を図4.1、4.2に示す。

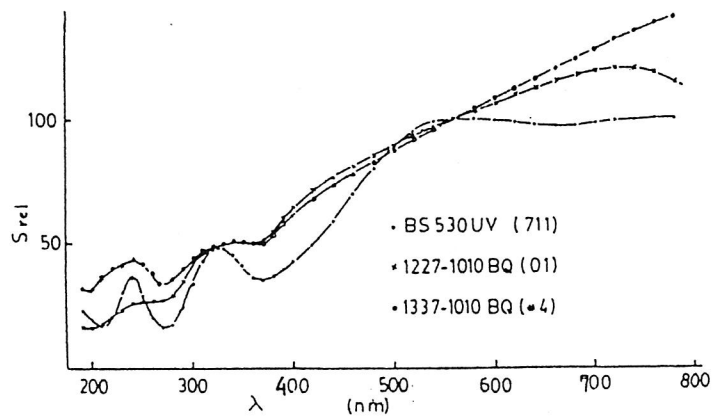


図 4.2 シリコンフォトダイオードの分光応答度

このようにして紫外 190nmまでの受光器分光応答度（相対） $S_r(\lambda)$  測定の技術を確立した。応答度の絶対レベルは、分光放射照度  $E(\lambda)$  が既知である分光放射照度標準または光度標準電球からの放射を、分光透過率  $\tau(\lambda)$  既知の帯域フィルタをとおして  $S_r(\lambda)$  を測定した受光器に入射して、その出力を  $I$  とすれば、(4.1) 式で求められる。

$$K = I \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \tau(\lambda) S_r(\lambda) d\lambda \quad (4.1)$$

ここで  $K$  は分光応答度の相対値を絶対レベル（単位：A/W など）に変換する係数である。なお、以上の手続きで値づけした受光器の  $S_r(\lambda)$  を、国内の4機関の間で比較測定した結果、波長 250~400nm での偏差は±4%（可視域では±1%）以内で、放射源の  $E(\lambda)$  測定の精度とほぼ同等なことが確かめられた。<sup>4)</sup>

#### 4. 2. 2 波長190~400nmでの放射源の分光放射照度測定<sup>5) 6) 7) 8)</sup>

分光応答度を基準にした（放射源の）分光放射照度の値づけには、 $S_r(\lambda)$  既知の受光器と2つの分光器、基準単色光をつくるための照射光源、および分光測定用の受光器（PM など）を用い、これによって試料光源の分光放射照度を測定する。具体的な方法と手順は次のとおりである。

1) 紫外域に強い放射がある安定な光源  $S_1$  と分光器  $MC_1$ （第1モノクロメータ）で単色放射を作り、それを設定波長毎に分光応答度  $S(\lambda)$  既知の基準受光器  $D_s$  で校正する。2) 校正した単色放射と試料光源からの放射（通常は連続スペクトル）を交互に分光器  $MC_2$  へ入射して分光測定用受光器  $D_m$  で比較測定する。単色放射は帯域幅が数 nm の狭帯域スペクトルであるため、放射パワーの  $MC_2$  による測定はラインスペクトルパワーの測定の手順と同様に設定（中心）波長を挟んだ走査で、応答プロファイルの面積を求める。試料光源の測定は設定波長のみでよい。

3) このような手順で得た測定値は、 $D_s$  の出力  $I_s(\lambda)$  と試料光源測定での  $D_m$  の出力  $I_m(\lambda)$  がともに電流 [A] で、 $MC_2$  を波長走査した単色光の  $D_m$  による出力の波長的な積分  $I_{r,\lambda}$  が [A·nm] であれば、基準受光器の分光応答度  $S(\lambda)$  の単位を [A·W<sup>-1</sup>·m<sup>2</sup>] とし、(4.2) 式で、分光放射照度  $E(\lambda)$  [W·m<sup>-2</sup>·nm<sup>-1</sup>] を導くことができる。

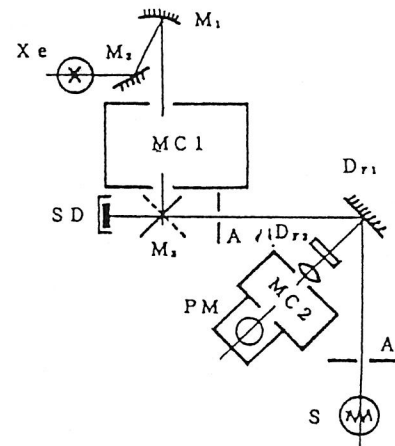
$$E(\lambda) = \{I_s(\lambda) [A] / S(\lambda) [A \cdot W^{-1} \cdot m^2]\} \cdot \{I_{mx}(\lambda) [A] / I_{r, \lambda} [A \cdot nm]\} \quad (4.2)$$

実際の測定では、 $D_s$ は校正済みのシリコンフォトダイオード、 $S_1$ はXeランプ、 $MC_1$ にNikon G250モノクロメータ、 $MC_2$ にOptometric MC1-01ミニモノクロメータ、 $D_m$ には光電子増倍管(PM)を用いた。試料光源は重水素ランプである。測定の光学系を図4.3に示す。これによって得られた重水素ランプの分光放射照度の例を図4.4に示す。

分光放射照度の絶対レベルは波長250nm以上でETL標準に合せてある。この測定はまず1974~75年に行ったが基準受光器(当時はサーモパイル)と $MC_2$ の入射拡散面配置に問題があり、系統誤差が懸念されたので、図4.3の光路で1994~95年に再測定を行ったが、大きな差は認められなかった。

図4.5にこの方法で測定した重水素ランプの分光放射照度をNIST(米国国立標準局1991)標準と比較した結果を示す。波長200~250nmで数%の相互差で一致していることが分る。

また、この方法で、放射源標準で値づけされた標準電球の波長300~550nmの分光放射照度を測定した結果は、図4.6に示すように相互差±1%であって、この方法が受光器標準による放射量の値づけの手段として、一般的に使用できることが分った。



- Xe: キセノンランプ
- M<sub>1</sub>: 集光ミラー
- M<sub>2</sub>: 平面ミラー
- M<sub>3</sub>: 光路切り換えミラー
- A: アパーチャ
- S: 試料放射源(ハロゲン電球, 重水素ランプ)
- Dr<sub>1</sub>: ハロン圧着面
- MC<sub>1</sub>, 2: モノクロメータ
- M<sub>2</sub>: 平面ミラー
- SD: 標準検出器
- PM: 光電子増倍管
- Dr<sub>2</sub>: 石英砂ずり板

図 4.3 受光器標準による分光放射照度測定の光路

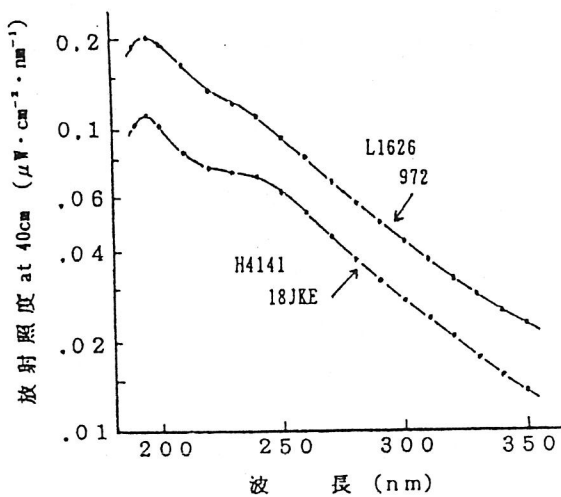


図 4.4 重水素ランプの分光放射照度

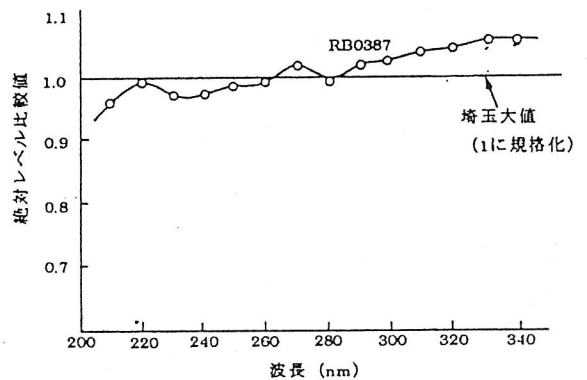


図 4.5 標準重水素ランプの分光放射照度相互比較

#### 4. 2. 3 低圧水銀放電 253.7nm 放射の測定

低圧水銀放電で発生する波長 253.7nm の共鳴放射は、古くから殺菌線とよばれて殺菌・消毒に用いられていて、外管を紫外線透過ガラスあるいは石英とした低圧水銀ランプ（殺菌ランプ GL）が広く使用されている。この 253.7nm 放射はラインスペクトルであることと、放射の強度が管電力 10W 程度でも分光放射照度標準電球の同じ波長域の放射より 3 桁以上大きいために、通常の分光測光技術では正確な測定がかなり困難である。そこで、この放射を直接比較測定できるような「標準殺菌ランプ」が使用者から要望されていて、

この目盛付けを受光器標準で行う研究が 1960 年に佐土根、森田によって行われて使用者への供給がなされた。<sup>9)</sup>しかし、このときの校正値は、当時の測光標準とは独立であったことと、測定者らが示唆しているように赤外域からの迷光の見積が十分でないこと、から再測定の必要があると見られていた。

このことを解決するために、1987 年に測光標準で直接校正した受光器（サーモパイル、シリコンフォトダイオード）によって 253.7nm 放射の放射照度の校正を行った。<sup>10)</sup>

一般に単独のラインスペクトルの受光器標準による測定は、狭帯域フィルタを用いることが多いが、253.7nm 放射では、この附近の波長域でピーク波長の透過率の高いフィルタが得にくく、従って、透過率の測定誤差が大きくなること、狭帯域フィルタには長波長側に副透過帯が在るものがあって、迷光混入の対策が必要なこと、サーモパイルのような検出能力の低い受光器を用いたときは、入射パワーが低下して S/N が十分でなくなるなどの問題点がある。佐土根、森田は、これらの事情を考慮して、図 4.7 に示すような差動フィルタ法を用いた。この方法は

253.7nm の透過率が高い第 1 遮断フィルタ（殺菌ランプの外管）と 253.7nm 放射を完全に遮断する第 2 フィルタ（差動フィルタ）を用いて、両フィルタの透過成分の差分を検出する。この場合 253.7nm 放射以外の放射の強度が小さくて、差動フィルタの短波長側の遮断点ができるだけ 253.7nm に近く、また両フィルタの長波長側の遮断特性がよく近似していないと余分な放射による誤差が入る。

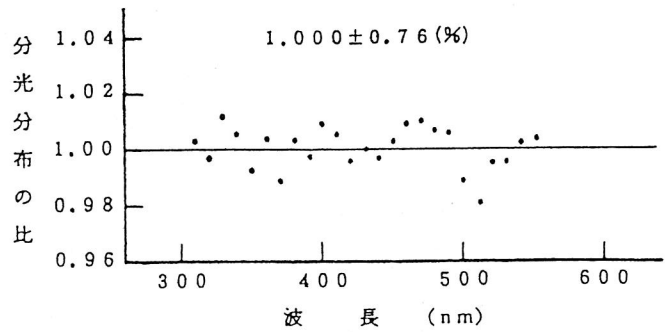


図 4.6 電球の分光分布の受光器標準から付けた値と放射照度標準から付けた値の比較

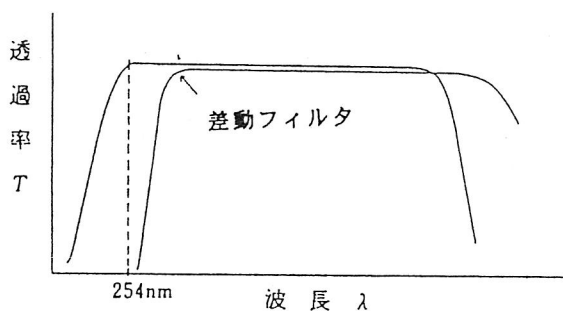


図 4.7 差動フィルタによる 253.7nm 放射の測定

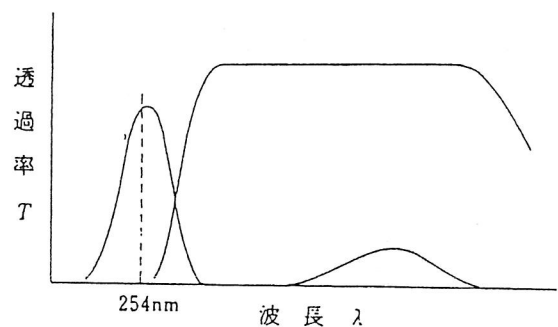


図 4.8 帯域フィルタと差動フィルタの併用

この差動フィルタ法の特長を生かして、誤差の発生を押さえる方法として、図4.8に示すような、253.7nmでも十分高い透過率をもつ中帯域フィルタと差動法の組み合わせを検討した。このようにすれば長波長側からの迷光をほぼ完全に評価して除去できるが、253.7nm以外の殺菌ランプの放射が中帯域フィルタの長波長側にないか、または差分測定用の第2フィルタの遮断点が253.7nmにできるだけ接近していることである。これはフィルタの種類を選択して達成できた。

この方法を主体として、従来の差動フィルタ法、分光測光法による測定を併用して15W殺菌ランプに測光標準目盛と直接につながる値付けを行った。得られた値と佐土根、森田の値には約5%の相互差が認められたが実用的に問題となる差異ではなかった。

1990年に、自己校正法で値づけしたシリコンフォトダイオードと2枚の狭帯域フィルタによる253.7nm放射の測定法（逆校正法）による値、NISTの黒体炉から分光法で得た値をこの値と比較したところ、3者の値は±1.5%以内で一致していた。<sup>11) 12) 13)</sup>

#### 4.3 窒素雰囲気、真空中での紫外放射測定

##### 4.3.1 測定環境の設定<sup>14)</sup>

真空紫外域での測定はベルジャーなどの真空容器を用いるのが通例であるが、構造が放射測定には余り適していないこと、測定機器の制御、信号の取り出しなどにかかなり多数の外部引出し用端子が必要なため、構造上これらの点で便利な真空デシケータ（アクリル製、容量70l）を利用した。しかし、容器に開口扉があること、内部に測定用の器具（シャッタ、チョッパ、フィルタ、試料の移動ステージなど）を設置するため、排気量165l/minのポンプによる到達真空度は0.4torr程度であり、波長160nmの放射に対してはかなり吸収が認められた。そこで、この状態で窒素（99.999%）を100torr程度導入し、これを再排気することで残留酸素の分圧を下げ、再度約0.4torrに減圧した後、ポンプを動作させたまま約3torrでN<sub>2</sub>フローを行えば波長160nmまでの測定が可能となったので、この状態での波長ごとの光路の吸収を測定した。測定は容器内で点灯した重水素ランプを前後に200mm移動して、容器の窓に取付けた真空モノクロメータVM502の入射面（MgF<sub>2</sub>砂ずり拡散板）の放射照度を求める方法で行なった。VM502の真空度は0.1torr以下である。吸収の大きさは、吸収の無い、波長200nm以上の放射照度と距離の関係を基準にして求めた。結果は図4.9のとおりで、このような2段階減圧を行なったときの透過率は波長160nmで、90%/10cm以上であり、距離による放射の減衰はBeerの法則によく従っていて、再現性もよかった。

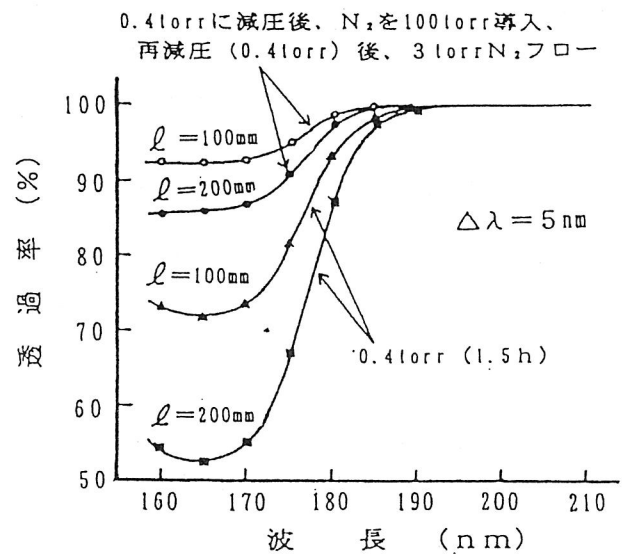


図 4.9 2段階減圧窒素雰囲気の透過特性

#### 4.3.2 波長 160~250nm での受光器の分光応答度の測定<sup>15)</sup>

容器内にミニモノクロメータMCI-01 (48×59×96mm) をセットして30W 重水素ランプを放射源としてCaF<sub>2</sub>レンズで集光して、白金黒塗付のPVDF焦電形検出器を標準としてサリチル酸ナトリウム検出器、シリコンフォトダイオードの相対分光応答特性を測定した。この波長域では、CaF<sub>2</sub>レンズの焦点距離は波長によってかなり変化して入射スリット上での結像状態が変動して、出射単色放射の均斉度が変化するので、それを防止するために測定波長毎にレンズと重水素ランプの距離を調整した。白金黒塗付のPVDF焦電形検出器を用いたのは、金黒塗付のものは受光面が帯電したので(光電子によると考えられた)、黒化材を仕事関数のより大きいものとして光電子放出を防止するためである(Ni黒も使用した)。標準と試料は波長毎に位置を交換して測定した。波長設定とこれらの位置調整はすべて遠隔操作である。これらの結果は図4.10のとおりで、サリチル酸ナトリウム検出器の相対量子効率是一定ではなく、波長200nm 付近で若干低下している。

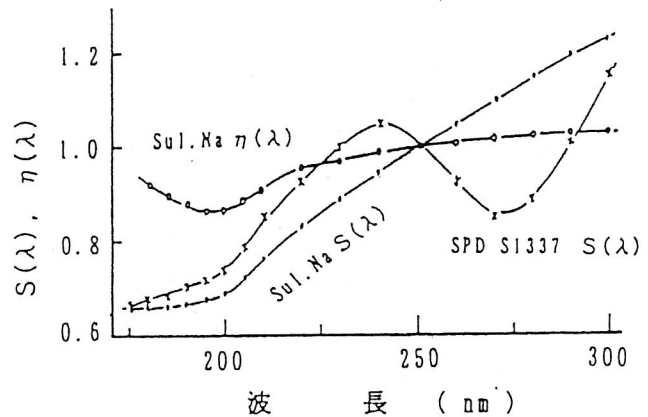


図 4.10 サリチル酸ナトリウムの分光応答度と分光量子効率及びシリコンフォトダイオードの分光応答度(相対値)

#### 4.3.3 波長 160~250nm での放射源の分光放射照度の測定<sup>16)</sup>

真空紫外域での分光放射測定は、通常の方法のように標準放射源と試料放射源を減圧容器内で直接置換して行なうことが難しい。その理由は、放射源を減圧雰囲気中で点灯すると放熱が不十分で安定性、再現性が悪くなるためである<sup>17)</sup>。放射源の中には本体を大気圧で点灯し、窓部のみを減圧容器にセットして使用するものもあるが、配光特性が悪く、それに加えて構造上から位置の再現が難しいため、放射照度の再現性を保つのが困難である(後述)。そこで次善の策として、分光放射測定系の分光応答特性  $S_{VM}(\lambda)$  を入射面、(真空)モノクロメータ、受光系を一体化した状態で測定して、試料からの放射を直接測定する方法で各種の放射源の真空紫外域での分光分布を測定した。

##### (1) 分光放射測定系の $S_{VM}(\lambda)$ の測定

測定系の  $S_{VM}(\lambda)$  は入射系の分光透過(又は反射)特性  $T_{DF}(\lambda)$ 、モノクロメータの分光透過特性  $T_{VM}(\lambda)$ 、受光系の分光応答特性  $S(\lambda)$  の積であって、その値と入射面に与えた放射パワーの分光分布  $E(\lambda)$  及び測定系の出力  $I(\lambda)$  の関係は次式ようになる。

$$I(\lambda) = E(\lambda) \cdot T_D(\lambda) \cdot T_{VM}(\lambda) \cdot S(\lambda) \quad (4.3)$$

従って、適当な手段で  $T_{DF}(\lambda) \cdot T_{VM}(\lambda) \cdot S(\lambda)$  の積  $S_{VM}(\lambda)$  が求められ、 $S_{VM}(\lambda)$  の値が経時的に安定していれば、測定系の出力  $I(\lambda)$  を求めて、(4.4) 式で  $E(\lambda)$  を直接測定することができる。

$$E(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{T_D(\lambda) \cdot T_{VM}(\lambda) \cdot S(\lambda)} = \frac{I(\lambda)}{S_{VM}(\lambda)} \quad (4.4)$$

以前に行われていたこの考え方による測定手法では、モノクロメータの分光透過特性と受光器の分光応答度を個別に測定して測定系の分光応答を求めていたため、装置を組合わせたときの光軸合せの難しさ、各々の測定の入射の照射状態が同じでない、などのため、信頼性、再現性が不十分であった。これらの問題点は、装置を一体化した状態で分光応答度が直接測定できれば解消できるが、そのためには放射照度が既知である単色放射を測定系に波長毎に与えて分光応答度を校正する必要がある、校正と測定の入射状態（空間的なむらの状態）を近似させなければならない。

ここで使用した放射測定系は入射面が $MgF_2$ の砂ずり透過面、受光系はサリチル酸ナトリウム蛍光体とPMの組合わせで、蛍光面とPM受光面に距離があるため受光面上の放射照度むらが緩和され、校正と測定での位置設定の相違などによる測定誤差の発生を小さくできると考えた。図4.11に  $S_{VM}(\lambda)$  を測定する方法を示す。この方法の手順は基本的には、4.2.2で述べたものと同じで、重水素ランプ  $D_2$  と第1モノクロメータ  $MC_1$  で単色放射を作り、分光応答度既知の標準検出器  $D_s$  と分光放射測定系の入射面に交互に与える。 $MC_1$  の設定波長に対する  $D_s$  の応答  $I_s(\lambda)$  から、入射面に与えられる単色放射の波長特性の(相対)値  $E(\lambda)$  が分り、これと分光放射測定系の応答  $I_{VM}(\lambda)$  の比をとれば  $S_{VM}(\lambda)$  が求まる。但し、入射が帯域幅の狭い単色放射で、放射測定系の帯域幅もほぼ同様であるため、設定した両帯域の最大値が合致する点(測定の中心波長に相当)を求めることが難しく再現性も悪い。そこで、 $MC_1$  の設定波長  $\lambda_s$  について、分光放射測定系の波長を  $\lambda_s$  の前→後に走査し波長的な積分量を求めた。これは分光放射測定系のスリット関数を通過する全放射を測定したと同じである。操作はすべて減圧容器内で行なっている。 $MC_1$  の入射系は $CaF_2$ レンズを用いた、4.3.2で述べたように測定波長ごとにレンズと放射源間の距離を調整し最良の結像を得るようにした。標準検出器には白金黒又はニッケル黒塗付のPVDF検出器またはこれらで分光応答度を校正したサリチル酸ナトリウム蛍光検出器を用いた。図4.12にこのようにして求めた相対分光応答特性  $S_{VM}(\lambda)$  を示す。 $S_{VM}(\lambda)$  の経時的安定性はかなり良好で、1~2ヶ月では有意な差が認められなかった。

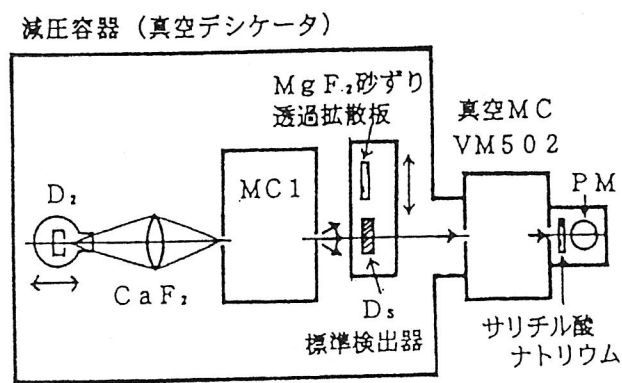


図 4.11 分光放射測定系の分光応答度測定法

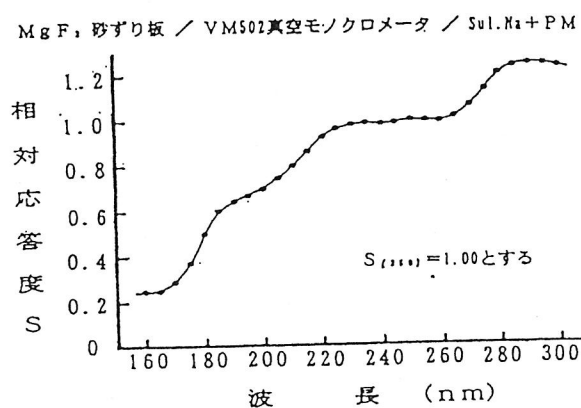


図 4.12 分光放射測定系の相対分光応答度

## (2) 真空紫外域での放射源の分光分布

### a) $MgF_2$ 窓重水素ランプの相対分光分布

真空紫外用  $MgF_2$ 窓(ロングノーズ形)重水素ランプの分光放射照度を測定した結果を示す。

ランプ本体は大気圧下で点灯し、突出した窓部のみを減圧容器内に挿入し放射出力は先端のMgF<sub>2</sub>窓から放射する構造である。配光特性が非常に悪く、減圧容器への取付が機械的に制約され、光軸合せとその再現は難しい。図4.13はその分光放射照度であり、波長170nm以下に非常に強い放射がある（ピークは150~160nmと考えられる）。放射照度の絶対レベルは波長250~300nmでハロゲン電球標準と比較して付けた。

b) 合成石英窓重水素ランプとXeランプの分光分布

図4.14に減圧容器内で点灯した合成石英窓の重水素ランプ（30W）と、合成石英管のXeランプ（75W）の相対分光放射照度を示す。Xeランプは波長180~185nmに大きなピークがある。この付近でのXeの発光は172nmにエキシマ発光があるが、波長的なずれがかなり大きい。但し、石英の透過率の遮断点に近い領域なので、石英管の透過率（点灯状態での）の影響によるピークのずれを検討する必要がある。

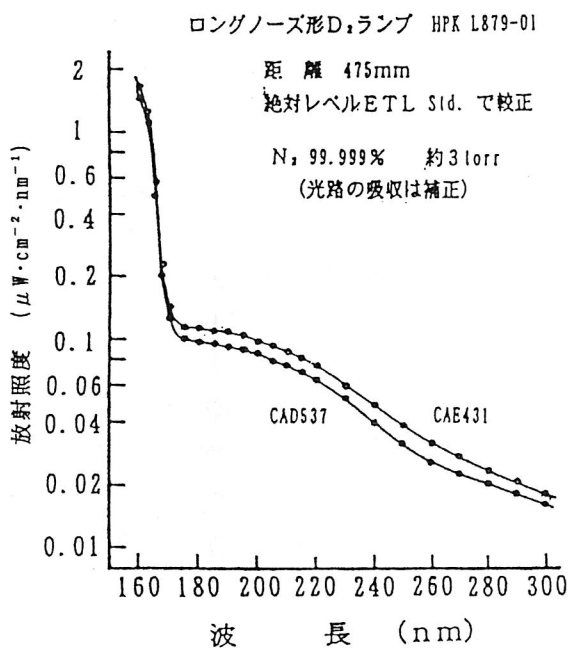


図 4.13 MgF<sub>2</sub>窓の重水素ランプの分光放射照度

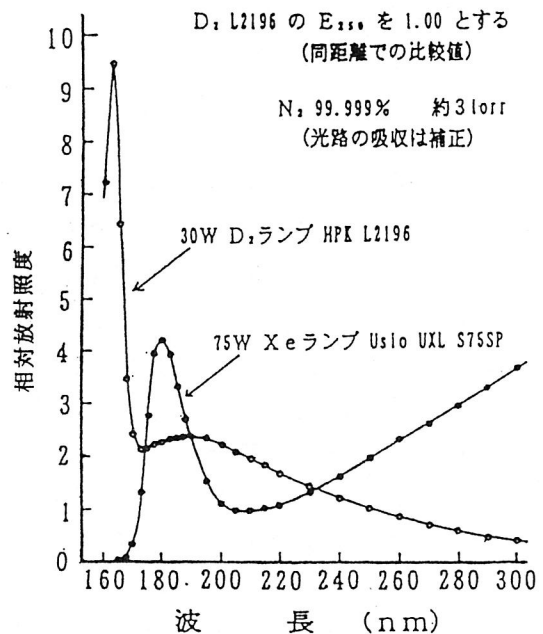


図 4.14 合成石英窓の重水素ランプと合成石英管のXeランプの分光放射照度

4. 3. 4 低圧水銀放電 185nm 放射の測定<sup>18) 19)</sup>

低圧水銀放電による放射は253.7nm（3重項の共鳴線）が最も強いが、185nm放射（1重項の共鳴線）もこれに次ぐ強度をもっている。185nm放射は光子エネルギーが大きいため物体表面の清浄化、光CVDなどの工業応用にかなり利用されているが、大気中では酸素による吸収（オゾンを発生させる）のため測定はかなり難しい。185nm放射の測定も単独ラインスペクトルであるため、4.2.3で述べた253.7nm放射と同様に受光器標準による方が測りやすく、帯域フィルタと差動フィルタの組合わせを用いる。通常の高圧水銀放電では、185nm放射の強度は253.7nm放射の0.2~0.3倍であるが、ランプの外管の透過率に大きく依存する。185nm付近の波長の帯域フィルタはピーク透過率が低く且つ長波長側の裾が長いものが多いので、帯域フィルタ単独では、253.7nm放射を完全に遮断することは困難で、必ず差動フィルタを併用して、混入した253.7nm放射成分を見積もらなければならない。図4.15に大気中での185nm放射の吸収状態を示す。

この測定は、合成石英管の低圧水銀ランプの185nm放射照度を受光面とランプの距離を変えて測定し、同じ条件での253.7nm放射照度と比較して行った。

表4.1 に各種の低圧水銀ランプの185nm放射強度を同じランプの253.7nm放射強度と比較して示す。管材質による相違が非常に大きいことが分る。これらの一連の測定は1988年に実施した。

表 4.1 各種の低圧水銀ランプの185nm放射 (253.7nm に対する比)

ランプの形名	E185/E254
GL-6 I	0.046
QGL-1 5	0.072
VUV-020-1.5S	0.219

#### 4. 4 真空紫外域での大気と窒素の吸収

真空紫外測定を行うに際して、光路の吸収をなくすために必要な真空度についての情報はほとんどない。また、窒素雰囲気についても吸収のデータは知られていない。そこで、これらについて波長160nmまでの系統的な測定を行った。

重水素ランプを、真空モノクロメータVM502が取り付けられるようにしたベルジャー内で、200mm移動できるように配置して、真空度をパラメータとして測定距離と放射照度の関係を波長毎に測定して、吸収を求めた。基準値は波長200nm以上の吸収の無い状態のデータとした。受光面はVM502の入射スリット前面に置いたMgF<sub>2</sub>砂ずり拡散面で、検出器はサリチル酸ナトリウム塗付面付きのPMである。測定の結果は図4.16~4.17に示すとおりで、光路長200mmのとき、真空度0.02torrで吸収は5%以下になる。

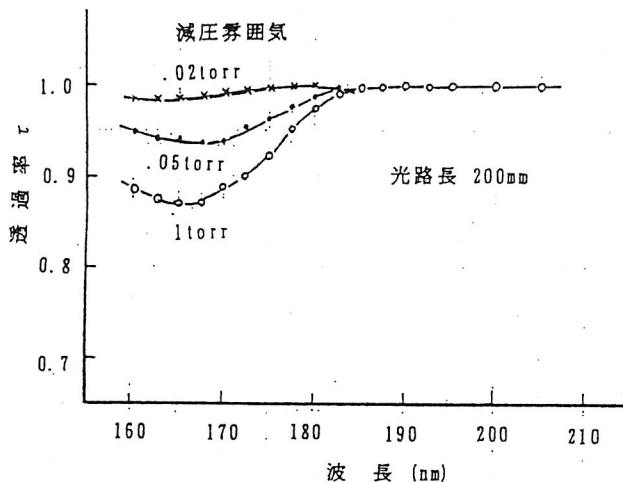


図 4.16 減圧雰囲気透過特性

$$I = I_0 \exp(-\alpha L + \beta L^2)$$

$$\alpha = 0.03, \beta = 3 \times 10^{-4}, L: (\text{cm})$$

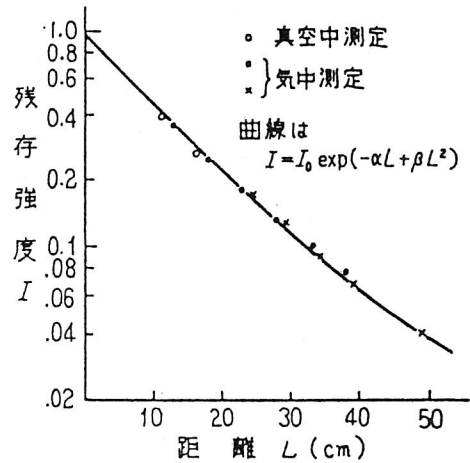


図 4.15 185nm放射の大気中での減衰状態

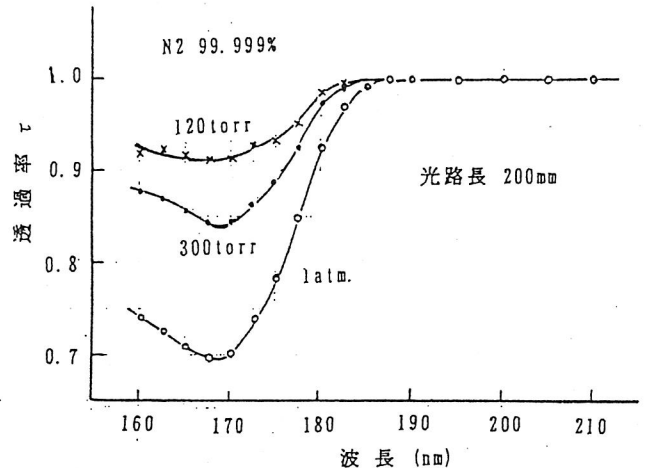


図 4.17 窒素雰囲気(99.999%)の透過特性

窒素雰囲気はベルジャー内を0.01torrまで減圧して純度99.999%の窒素を導入して設定した。圧力を1気圧とすると波長170nm付近でかなりの吸収があることが分り、窒素雰囲気でもかな

りの減圧が必要と考えられる。なお、光路長 200mm までの吸収による放射の減衰は Beer の式  $I = I_0 \exp(-kL)$  によく一致する。吸収係数  $k$  (100mm毎)を図4.18, 4.19 に示す。

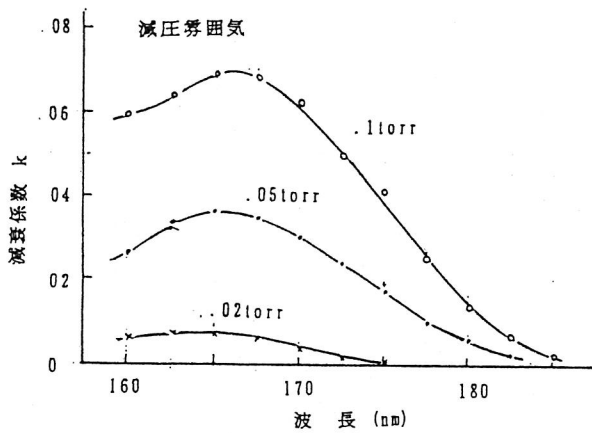


図 4.18 減圧雰囲気中の減衰係数

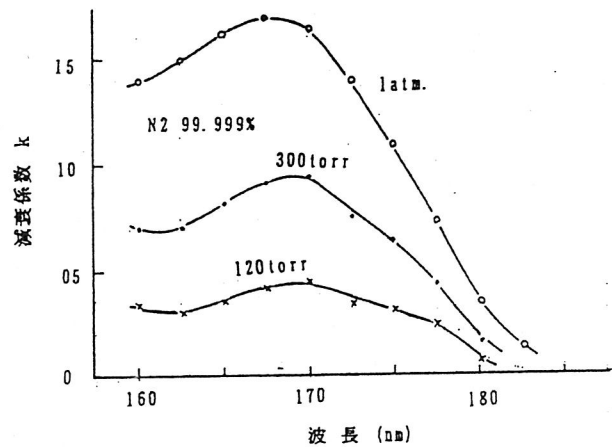


図 4.19 窒素雰囲気 (99.999%) の減衰係数

## 文 献

- 1) 中川、大谷：受光器分光感度の紫外・可視域での精密測定 (1) 照学誌 66, 439-444 (1982)
- 2) 中川、大谷：受光器分光感度の紫外・可視域での精密測定 (2) 照学誌 67, 514-519 (1983)
- 3) 中川、大谷：受光器分光感度測定の精度に及ぼす入射光学系の配置の影響  
照学会放射の応用研究会資料 AR-79-7 (1979)
- 4) 中川ほか：光検出器の分光応答度の国内比較 照明学会誌 77, 658-665 (1993)
- 5) 中川、大谷：短紫外域での分光放射照度の測定 電学論文誌A 95A, 365-371 (1975)
- 6) 中川、大谷：波長200nmまでの分光放射照測定 照学誌 59, 462-467 (1975)
- 7) 中川ほか：分光応答度標準にもとづく光放射測定 第27回照学会全国大会156 (1994)
- 8) 中川ほか：分光応答度標準にもとづく光放射測定 (2) 第28回照学会全国大会162 (1995)
- 9) 佐土根、森田：殺菌灯、ブラックライトの全放射束測定 照学誌 44, 529-540 (1960)
- 10) 中川ほか：253.7nm 放射照度 (殺菌線放射照度) の値付け 照学誌 71, 646-650 (1987)
- 11) 大久保、大野、中川：シリコンフォトダイオードの自己校正法にもとづいた  
253.7nm 放射の絶対測定 (2) 照学誌 75, 282-287 (1991)
- 12) K. Ohkubo et. al: Calibration of 254nm Irradiance based on the Silicon Photodiode  
Self-calibration Technique Appl. Optics 32-25 4845-4821 (1993)
- 13) 大久保ほか：253.7nm放射照度測定値の国内比較 照学誌 83, 109-114 (1999)
- 14) 中川ほか：真空紫外域での分光放射測定 第31回照明学会全国大会156 (1998)
- 15) 中川ほか：真空紫外域での分光放射測定 (2) 第26回照学会東京支部大会2-9 (1998)
- 16) 中川ほか：真空紫外域での分光放射測定 (3) 第32回照明学会全国大会156 (1999)
- 17) 中川ほか：真空および窒素雰囲気中でのランプの放射特性  
第25回照明学会全国大会126 (1992)
- 18) 中川ほか：紫外 185nm 放射の測定 照学誌 72, 319-323 (1988)
- 19) 宮尾、中川、白水：光センシング工学 4章 (1995) 日本理工出版会

(中川 靖夫)

## 5. 低圧水銀ランプスペクトル線 185.0nm および 253.7nm の放射束の相互比較

### 5.1 はじめに

日本においては、2.1 および 2.2 にあるように、90-250nm の波長域の分光応答度標準、250nm 未満の分光放射照度標準が未確立で、現在電総研において開発中の段階にある。その一方、近年は紫外放射利用が急速に拡大しており、その検出器標準ならびに放射標準はもとより、標準的な測定方法の確立に対する要望が高まっている。このような情勢を踏まえ、本研究調査委員会において、電総研を中央局として本委員会を構成する希望各機関の間で、標準未確立の波長域も含め、低圧水銀ランプスペクトル線 185.0nm および 253.7nm の放射束測定の国内比較を実施することとした。

測定項目を上記のようにしたのは、以下のような理由による。紫外放射利用の分野で放射源として低圧水銀ランプの利用が多いと考えられること、線スペクトルであるために、分光器を用いなくてもフィルター等により比較的簡便に当該スペクトル線を選択でき、かつ波長幅はフィルター等の分光素子で決まるのではなく放射源側の自然幅で決まることになり比較測定が容易であること、放射束の測定を通して需要の多い検出器の分光応答度の比較にもなりうること、これまで国内では 185.0nm での比較測定は行われていないので、比較測定実績のある 253.7nm での測定と同時に組み合わせることにより、現状の把握と相互の参照が可能となること等である。

### 5.2 放射源と測定系

比較測定は以下の条件で行った。

- ・対象放射源：低圧 Hg ランプ（浜松ホトニクス製ペン型低圧水銀ランプ L937-02（アパチャシールドなし））。以降ペンレイと略称。
- ・点灯方式：直流定電流点灯（16 mA）
  - ・波長：185 nm, 254 nm の輝線のみ（大気中測定）
- ・大気中の距離（ランプガラス管壁から検出器窓端）：約 50 mm
- ・ビーム発散角： $\pm 11.5^\circ$  ( $=\text{asin}(4/20)$ )
- ・測定場所：工業技術院計量標準センター
- ・室温： $23.0 \pm 0.3$  [°C]

比較測定に先立ち、ペンレイの安定性試験を行った。その結果、付属の AC 電源で動作させるより、直流で定電流動作させる方が安定性に優れていることがわかった。動作電流を変えて、最適な条件の探索を試みた結果、約 16 mA 付近で安定性が優れていることがわかったので、今回の一連の測定はこの電流で動作させた。ただし、一般に駆動電流が定格よりも小さいと放電管の管壁の温度が十分上がらず、水銀の蒸気圧が低くなるためか、しだいに点灯開始電圧が上昇し、しまいには放射出力が突然低下

する不具合が生じることが見出された。事前の試験ではそれが起こる延べ点灯時間は、今回の比較測定の前点灯時間に比べ、はるかに長かったので、比較測定を実施することにしたが、同様の減少が、相互比較開始後2回目の測定中発生してしまう事態となった。幸い低圧水銀ランプに印加する極性を反転させる措置をすることによって、以前とほぼ同じ放射強度が再現され、本比較測定遂行上重大な問題にはなっていない。

今回の比較測定では、放射源の安定性が十分に保証が出来るものとは限らない可能性があったので、その185.0nmおよび253.7nmのスペクトル線の強度をモニターする検出器を設置することとした。

今回の比較測定で用いた放射源ならびにモニター検出器の概略図を図1に、その詳細な構造を図2に示した。放射出力は温度の強い関数になっているので、ペンレイの放電管の周りをさらに石英管で囲んで二重管とし、安定化を図った。モニター検出器はそれぞれの波長毎に干渉フィルタとGaPフォトダイオードとから成っている。比較測定を行う場合は、モニター検出器を取り外して行う。それぞれの構成部品は以下の通りである。

- ・ GaP フォトダイオード：浜松ホトニクス製 G1963 (石英窓、長波長側感度限界：550 nm、受光面サイズ：4.6 mm 角)

- ・ 干渉フィルター：

- 185 nm：Acton Research Co. 製 185-HR-.5D (半値幅 20 nm、透過率 10%)

- 254 nm：Barr Associates Inc. 製 CW254NM15PY (半値幅 10 nm、透過率 18%)

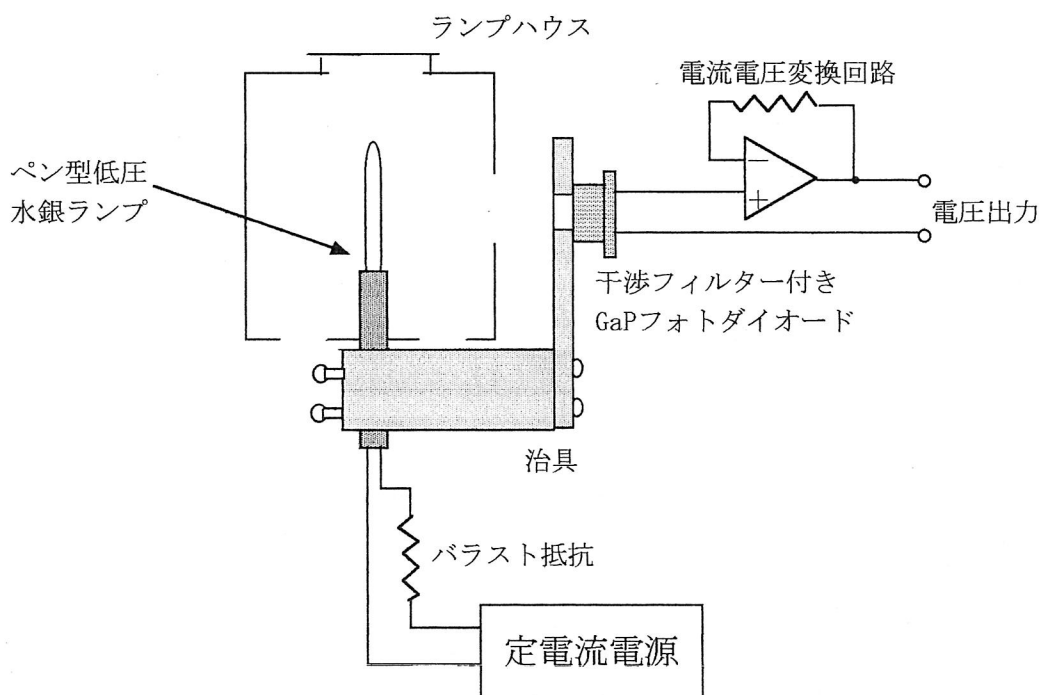


図1 比較測定で用いた放射源ならびにモニター検出器の概略図

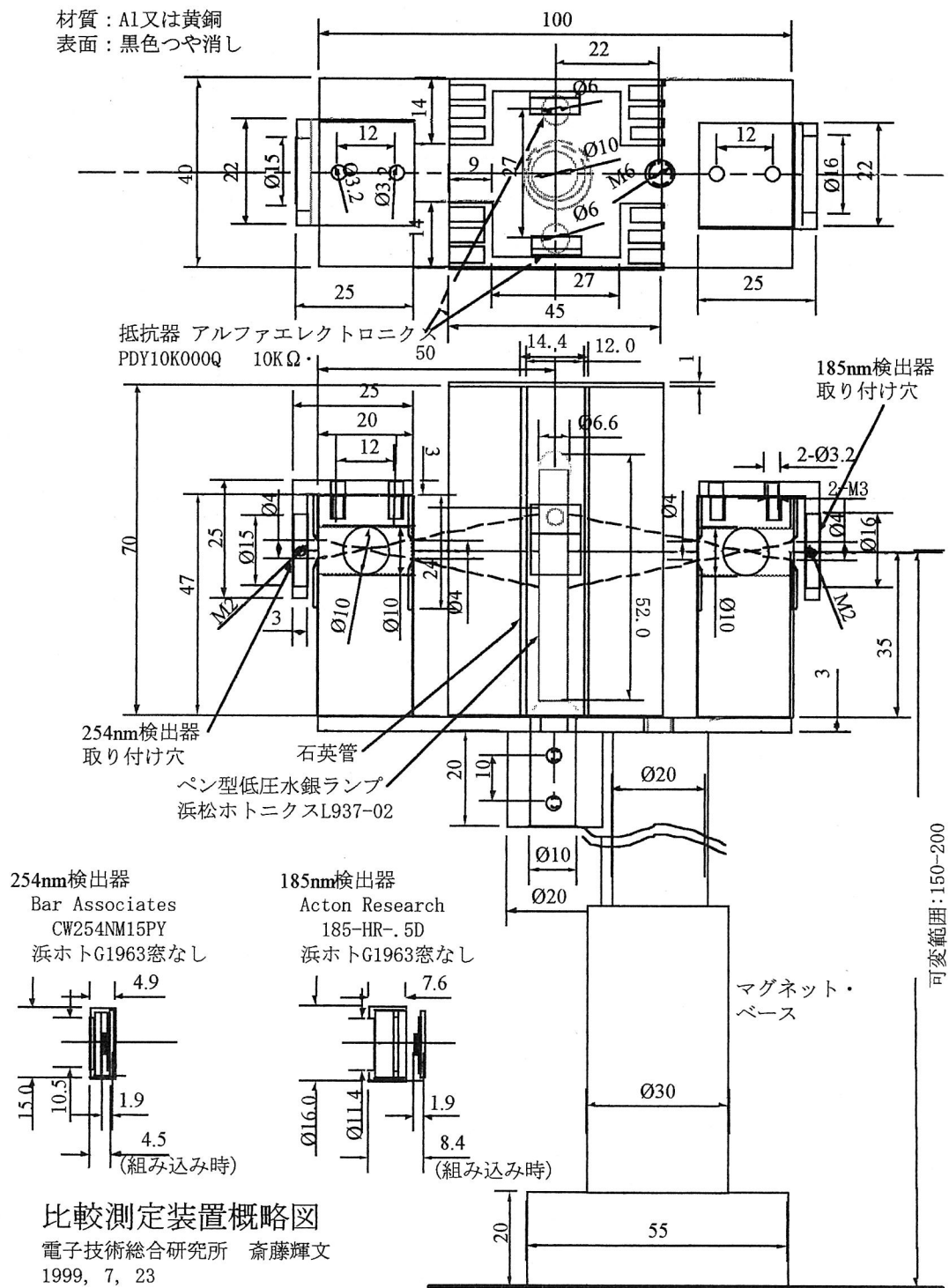


図2 比較測定で用いた放射源ならびにモニター検出器の構造図

この装置を用いて行った放射源の安定性試験結果の一例を図3に示した。放電管の駆動電流は16 mAの定電流である。

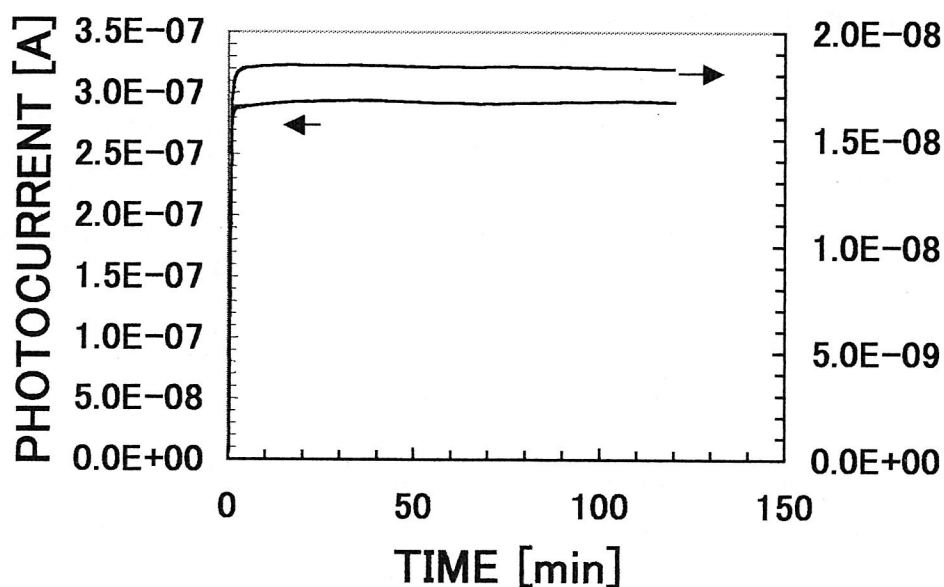


図3 ペン型低圧水銀ランプ安定性試験結果の一例。左縦軸は 254 nm の放射、右縦軸は 185 nm の放射のモニター検出器出力を示す。

### 5. 3 比較測定結果

各参加機関の標準の由来、校正方法等を、波長 185 nm および 254 nm について、それぞれ表 1、表 2 に示した。今回の比較測定の基準として、幹事所の電総研が NIST の分光応答度標準 (Si フォトダイオード) を用いて、当該低圧水銀ランプスペクトル線の 185.0nm および 253.7nm の放射束を与えたが、その不確かさの見積もりを表 3 に示した。表 3 にあげた項目の中、f. は検出器に関わるものではないが、放射束を与える際の不確かさとして含めてある。なお、b. 標準器からの値付けには、干渉フィルタの透過率測定、相互反射による誤差等を含み、d. 使用検出器の感度むらには、干渉フィルタの透過率むらも含んでいる。

今回の比較測定の結果を表 4 に示した。

表1 各参加機関の校正方法等 (185 nm)

参加機関	保有している標準器	保有している標準器で保持されている量	保有している標準器のトレーサビリティ起源	トレーサビリティ起源から今回標準器への値付け方法等	保有している標準器からの測定の値付け方法等	保有している標準器の最終校正時期	本定に不確かさ	比較お見積り	測りかか積も	備考
電総研(NIST)	NIST Si-PD 分光応答度	分光応答度	NIST 分光応答度	低圧水銀ランプ+フィルタの系を比較測定	フィルタ透過率を利用	1997, 3	15			
A	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
B	NIST Si-PD 分光応答度	分光応答度	NIST 分光応答度	低圧水銀ランプ+フィルタの系を比較測定	フィルタ透過率を利用					不確かさ不明
C	NIST Si-PD 分光応答度	分光応答度 分光放射照度	NIST 分光応答度 ETL 分光放射照度	干渉フィルタ法 差動フィルタ法			26			不確かさ内訳不明
D	市販の紫外線照度計 (オーク UV-185)	放射照度	市販の紫外線照度計		フィルタを組み込んだ状態で校正	1993, 1	20			
E	市販の紫外線照度計 (オーク UV-185)	放射照度	市販の紫外線照度計			1999, 10	20			
F	NIST Si-PD, CsTe-PT 分光応答度	分光応答度	NIST 分光応答度	低圧水銀ランプ+フィルタの系を比較測定	フィルタを組み込んだ状態で校正	1999, 3	12			
G	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

表2 各参加機関の校正方法等 (254 nm)

参加機関	保有している標準器	保有している標準器で保持されている量	保有している標準器のトレーサビリティ起源	トレーサビリティから標準値の付け方等	保有している標準器からの今回の測定の方法等	保有している標準器への最終校正時期	本比較測定における不確かさ見込み [%]	備考
電総研 (NIST)	NIST Si-PD 分光応答度	分光応答度	NIST 分光応答度	低圧水銀ランプ+フィルタの系を用いた比較測定	フィルタ透過率を利用	1997, 3	18	
A	低圧水銀ランプ	放射照度	埼玉大放射照度標準	不明	フィルタを組み込んだ状態で校正			記載なし
B	NIST Si-PD 分光応答度	分光応答度	NIST 分光応答度	低圧水銀ランプ+フィルタの系を用いた比較測定	フィルタ透過率を利用			不確かさ不明
C	NIST Si-PD 分光応答度	分光応答度 分光放射照度	NIST 分光応答度 ETL 分光放射照度	低圧水銀ランプ+フィルタの系を用いた比較測定 差動フィルタ法	フィルタ透過率を利用		27	
D	放射照度標準 (GL-15)	放射照度	埼玉大光度標準、分光放射照度標準	差動フィルタ法	フィルタを組み込んだ状態で校正	1996, 11	>2	標準器の不確かさ不明
E	—	—	—	—	—	—	—	データ撤回
F	NIST Si-PD, CsTe-PT 分光応答度	分光応答度	NIST 分光応答度	低圧水銀ランプ+フィルタの系を用いた比較測定	フィルタを組み込んだ状態で校正	1999, 3	11	
G	—	—	—	—	—	—	—	データ撤回

表3 比較測定における電総研によって与えられた放射束の不確かさ見積もり

項目	185 nm	254 nm
	2 $\sigma$ 不確かさ[%] (信頼係数 95%)	2 $\sigma$ 不確かさ[%] (信頼係数 95%)
a. 保有している標準器の不確かさ	8	7
b. 標準器からの値付け	9	8
c. 測定の統計的ばらつき	0.3	0.2
d. 使用検出器の感度むら	7	8
e. 使用検出器の感度変化	6	7
f. 放射源強度の再現性	3	9
総合 (2乗和の平方根)	15.5	17.5

表4 比較測定結果

参加機関	185 nm			254 nm		
	放射束 [ $\mu$ W] @185nm	不確かさ [%] (k=2)	備考	放射束 [ $\mu$ W] @254nm	不確かさ [%] (k=2)	備考
電総研 (NIST)	3.47	15		46.2	18	
A	—	—	不参加	146.1	4.0	
B	4.5		不確かさ不明	111.6		不確かさ不明
C	1.18	26		50.7	27	
D	0.99	20		48.6	2	
E	3.5	20		—	—	データ撤回
F	4.13	12		48.2	11	
G	—	—	不参加	—	—	データ撤回
電総研 (NIST)	3.61	15		52.2	18	

#### 5.4 考察とまとめ

表4の比較測定結果は、185 nm、254 nmの双方とも、大きくばらつく結果となった。その原因には、主として以下の要因が推測される。

1. 今回の測定は、放射束の測定であるので、入射放射が完全に検出器の受光面内におさまる必要があったが、一部に不徹底の所が見受けられ、この条件が完全に満たされていない可能性があった。

2. 参加機関の中で市販の紫外線照度計を今回の測定に用いている機関が複数あったが、放射照度として表示される値から、放射束に換算するためには、その紫外線照度計の受光面積を掛ける必要があるが、その際に以下の問題点がある。
  - a. 市販の紫外線照度計には、いずれも必要となる受光面積が仕様として明示されておらず、実測値から推定する以外方法がなかった。検出器の前に拡散板が設置されているので、この場合必ずしも拡散板の前のアパーチャ径がその面積を与えるとは限らないことが考えられる。
  - b. 市販の紫外線照度計は受光部全面に、(一様な)放射を入射して校正されているので、場合によっては、感度むらがあることが予想され、この場合には、どの部分に入射させるかで、指示が異なることになる(実際、今回の一参加機関から、照度計受光面の位置の関数として、大きく指示値が異なることが後に報告された)。
3. 254 nm 放射に関しては、ダーク測定をするために遮光板を光路中に挿入すると、オゾンの吸収のためか、元の値に回復するまで数分を要した。従って、254 nm 放射の放射束の再現性が見積もりの不確かさを上回っていた可能性も否定できない。
4. 参加機関の中で、検出器とフィルターのハウジングにテフロンを用いている所があったが、テフロンは可視域近傍においては遮光性がないので、室内灯に感じる問題があった。当該機関内でのその検出器への校正にそのための誤差があった可能性も考え得る。

その他、分光素子の単色性が確保されているかどうかの問題(他波長スペクトル線の分離能力が十分かどうか)、185 nm 放射の空気による吸収にともなう誤差、等の問題が考えられる。また、当該波長では、感度むらと安定性の確保が、強い吸収のために他のどの波長帯よりも困難であることを忘れてはならないであろう。

今回の比較測定を行って感じたことの一つとして、以下のことを紫外線放射照度計のメーカーに要望したい。放射照度あるいは分光放射照度は放射源からの距離の関数であるので、放射源からのどの距離における照度を測っているかを知ることは必須である。しかし、今回目にした紫外線放射照度計には、測定位置を参照するマーキングなりの情報の記載が取扱説明書に見当たらなかった。また、先に述べたように、放射照度計を用いて underfill のビームのパワーを知りたい時に必要となる有効面積の記載も見当たらなかった。後者の目的は想定外かもしれないが、これらの情報を記載して頂く様、善処を期待したい。

(電子技術総合研究所 齋藤輝文)

## 6. おわりに

高精度な短波長紫外線（110 nm～300 nm）の標準的な測定法を見定めるために、当該波長領域の紫外放射の利用と測定技術に関する現状と問題点、光源および検出器の進展、標準光源・標準検出器の国内外の開発状況およびトレーサビリティの現状を調査した。本調査により、大筋において次のようなことが結論づけられた。

- ・短波長紫外線の利用は非常に多岐にわたっており、各種の放射測定を一つの方法に統一することは原理的に困難と思われる。最大公約数的な測定に関して、標準的な測定法を提示することは可能である。
- ・各社が有する分光応答度の検出基準と、測定技術能力には小さくない差が見られる。
- ・短波長紫外域の国内トレーサビリティを早期に確立する必要がある。緊急の課題として電総研を中心に産業界の協力を得て、強力に推進していかなければならない。

光技術は 21 世紀における技術の大きな流れの中にあると思われる。その成長を支えるために短波長紫外放射の計測技術を一日も早く確立させる必要があり、本報告書がその一助になれば幸いである。

（電子技術総合研究所 小貫英雄）

## 研究調査委員会報告書の著作権について

本報告書の著作権は（社）照明学会に帰属します。

複写をされる方に

本報告書に掲載された著作物は、政令が指定した図書館で行うコピーサービスや、教育機関で教授者が講義に利用する複写をする場合等、著作権法で認められた例外を除き、著作権者に無断で複写すると違法になります。

