

JAERI - M
88-126

JT-60プラズマの真空紫外域分光写真測定
(15 ~ 1360 Å)

1988年7月

久保 博孝・杉江 達夫・逆井 章
小出 芳彦・西野 信博*・赤岡 伸雄

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公開している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 山田軽印刷所

JT-60プラズマの真空紫外域分光写真測定
(15~1360Å)

日本原子力研究所那珂研究所臨界プラズマ研究部

久保 博孝・杉江 達夫・逆井 章

小出 芳彦・西野 信博*・赤岡 伸雄

(1988年6月13日受理)

JT-60プラズマの不純物挙動の診断の為に、3mの斜入射分光器を用いて、真空紫外域での分光写真測定を行なった。ここでは、JT-60の初期OH実験、高イオン温度モード実験、及び、真空容器の第一壁の40%を炭素にした後の実験における測定結果について報告する。JT-60の初期OH実験では、15~1360Åの波長範囲で同時に写真測定を行ない酸素、炭素、チタンなどが不純物として同定された。高イオン温度モードでは、17~77Åの波長範囲で測定を行ない、上記の不純物の他に高電離のモリブデンのスペクトル線が観測された。炭素化後の実験においては、15~55Åの波長域で測定を行ない、チタンなどの金属の混入が少なくなった事が確認できた。

Spectrograms of the JT-60 plasmas in the Vacuum Ultraviolet Region
(Wavelength Region 15~1360 Å)

Hirotsuka KUBO, Tatsuo SUGIE, Akira SAKASAI
Yoshihiko KOIDE, Nobuhiro NISHINO* and Nobuo AKAOKA

Department of Large Tokamak Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-Machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 13, 1988)

Spectrograms in the vacuum ultraviolet region have been obtained by a 3 m grazing incidence spectrograph in order to study impurity behaviors in JT-60 plasma. The spectrograms have been investigated in the first OH experiments, High-Ti mode experiments, and the experiments that were carried out after the replacement of 40% of the first wall of the vacuum vessel with graphite tiles. In the first OH experiments, the spectrogram which covered the wavelength region of 15~1360 Å was obtained, and spectral lines of oxygen, carbon, and titanium were identified. In High-Ti mode experiments, the spectrogram which covered the wavelength region of 17~77 Å was obtained, and spectral lines of highly ionized molybdenum were identified in addition to those of oxygen, carbon, and titanium. In the experiments after the replacement of the first wall, the spectrogram which covered the wavelength region of 15~55 Å was obtained, and it was found clearly that the metallic impurities decreased.

Keywords: JT-60, Tokamak, Vacuum Ultraviolet Region, Spectrogram,
Impurity, Grazing Incidence Spectrograph

* On leave from Hitachi Energy Research Laboratory

目 次

1. 序論	1
2. 実験条件	2
3. 同定結果	3
4. まとめ	4
謝辞	4
参考文献	5

Contents

1. Introduction	1
2. JT-60 Operation Condition and Experimental Technique	2
3. Results of Line Identifications	3
4. Summary	4
Acknowledgements	4
References	5

1. 序 論

大型トカマク装置における不純物の挙動解明は、JT-60の主要テーマの1つである。不純物は、臨界条件達成の上において、2つの理由で重要な問題となる。第1には不純物の混入により入力したエネルギーが放射の形で損失する事、第2にはプラズマ中での水素の密度が実質的に減少する事である。JT-60では、これらの不純物の挙動解析の為に総合的に分光測定を行なっている。¹⁾²⁾³⁾

トカマク装置では電子温度が数 keV になる為、混入した不純物はプラズマ中では高電離状態にあり、それによる放射は、ほとんどが真空紫外の領域になる。従って、真空紫外域における写真測定は、プラズマ中に混入した不純物を同定したり、光電測定の場合にどのスペクトル線に着目するか判断するための基礎データとして重要である。尚、可視領域の分光写真の同定結果については、文献4を参照して頂きたい。

JT-60は、昭和60年4月よりOH実験を開始し⁵⁾、8月より加熱実験を始め、昭和62年3月には高イオン温度モードにより中心イオン温度11 keV、中心電子温度5 keVを達成した⁶⁾。この期間の実験では、リミターとダイバーター・プレートはTiC被膜のモリブデンを、ライナーはTiC被膜のInconelを使用していた。昭和63年6月からの実験においては、プラズマ電流を増加しリミター放電において臨界条件を達成するために、リミター、ダイバーター・プレートを含む真空容器の第1壁の40%を、炭素タイルに変えて実験を行なった⁷⁾。

本論文では、JT-60の初期OH実験における15~1360 Åの波長域での分光写真撮影、高イオン温度モードにおける17~77 Åの波長域での撮影、及び炭素化後の15~55 Åの波長域での写真撮影の結果について述べる。

2. 実験条件

本写真測定は、JT-60の不純物挙動診断システムの斜入射域絶対測光基準サブシステム³⁾⁸⁾を用いて行なった。本サブシステムはJT-60真空容器中心を通る鉛直の視線でプラズマを上方から観測する斜入射分光器である。

本分光器はローランド円の直径が3m、入射角が 87.5° の斜入射分光器であり、溝本数が600本/mm、実効ブレース波長が 133Å の回折格子を用いており、波長分確能は約 0.1Å である。波長範囲は $5\sim 1360\text{Å}$ であり、この波長範囲に対応するローランド・ベッドが分光器の真空容器内に収まっている。図1にローランド円に沿った逆線分散と波長との関係を示す。写真撮影としては、フィルムと乾板が利用できる。フィルムによる撮影においては、KODAK社製101を用いて、ローランド・ベッドにそって1.2m長さで0次光から 1360Å の波長範囲を同時に測定した。また、乾板撮影の場合は、KODAK社製SWR、サイズ50.6×253mmを使用した。尚、ここで示す分光写真は入口スリット幅 10μ 、長さ4mmの設定で測定されたものである。

初期実験においてフィルムで測定した $15\sim 1360\text{Å}$ の波長域におけるスペクトル線の同定結果を図2.1～2.11に示す。これは、E000975～E001020の放電で得られた結果であり、観測した放電の主なパラメータを表1に示す。これらの放電は、JT-60のOH調整用の放電であり、放電時間が7.5秒以下、プラズマ電流1.0MA以下であるが、軟X線のPHA測定によるとプラズマ中心では1.5keV程度の電子温度が得られている。全体で33ショット(正常放電19ショット)、全露光時間90.4秒で撮影した。

高イオン温度モードにおける $17\sim 77\text{Å}$ の波長域による分光写真の測定結果を図3.1～3に示す。これは、E003976～E004001の放電で得られた写真であり、この主な放電条件を表2に示す。これら放電はすべてリミター放電であり、 $P_{NB1} \leq 23\text{MW}$ 、 $P_{LH} \leq 3\text{MW}$ 、 $P_{IC} \leq 0.63\text{MW}$ の追加熱が行われている。トムソン散乱の測定によると、追加熱時のプラズマ中心での電子温度は $3.8\sim 7.0\text{keV}$ に達している。全ショット数26のうち、ディスラプションが6ショット含まれており、全露光時間は243秒である。

炭素壁での実験で得られた $15\sim 55\text{Å}$ の波長域における乾板撮影の結果を図4.1～2に示す。これは、E005379～E005439の放電で得られた写真であり、この主な放電条件を表3に示す。放電はすべてリミター放電であり、 $P_{NB1} \leq 21\text{MW}$ 、 $P_{LH} \leq 2.7\text{MW}$ 、 $P_{IC} \leq 1.8\text{MW}$ の追加熱が行われている。トムソン散乱の測定によると、追加熱時のプラズマ中心での電子温度は $2.0\sim 3.4\text{keV}$ に達している。全ショット数50のうち、ディスラプションが18ショット含まれており、全露光時間は454秒である。

3. 同定結果

撮影した分光写真は、デンシト・メーターにかけ、文献9-12に基づいて、スペクトル線の同定を行なった。

初期OH実験の写真撮影(図2)は、15~1360Åの広範囲におよんでいるので、真空紫外での不純物のスペクトル線の分布がよくわかる。40Åまでの短波長領域では、軽元素(酸素、炭素)の1s-2pのラインの他、Ti XIIIのラインが強く観測できる。50~80Åの領域のバック・グラウンドは、0次光がフィルム面で反射し再びフィルム面に入射することにより生じたものである。100~200Åの領域には、チタンの $2s^2 2p^{\ell} - 2s 2p^{\ell+1}$ 、 $3p^{\ell} - 3p^{\ell-1} 4\ell$ の遷移に伴うスペクトル線が多く観測される。同様に、250~300Åの範囲では、チタンの $3p^{\ell} - 3p^{\ell-1} 3d$ の遷移に伴うスペクトル線が多い。540~1040Åの範囲では、酸素の $2s^2 2p^{\ell} - 2s 2p^{\ell+1}$ の遷移に伴うスペクトル線が同定できる。この写真から、不純物としては、酸素、炭素、チタンが主であると考えられる。ニッケルのスペクトル線は全体に弱く、ニッケル、窒素及びモリブデンのスペクトル線については、更に検討を要する。

高イオン温度モードにおいては、酸素、炭素の他、チタンのスペクトル線が強く観測される。(図3)また、Mo XXXIVの $2s^2 2p^{\ell} - 2s 2p^{\ell}$ のスペクトル線が明かに同定できる。これは、これらの実験がリミター放電のため、リミターからのモリブデンの混入が生じているからである。Mo⁺³³は、イオン化ポテンシャルが4.43keVであり、電子温度の上昇により非常に電離が進んでいることがわかる。更に電離の進んだモリブデンのスペクトル線については、原子物理学的に興味深く、現在更に検討中である。尚、43Å以上の領域におけるバック・グラウンドは、現像むらである。

第一壁の炭素化の後の写真(図4)では、金属壁での実験と同様に、酸素、炭素のスペクトル線が観測される。チタンのスペクトル線は、金属リミターの実験と比較して明らかに弱くなっている。

4. ま と め

JT-60プラズマの不純物の挙動診断の為に、3mの斜入射分光器を用いて、真空紫外域での分光写真測定を、初期OH実験、高イオン温度モード実験、炭素壁での実験において行なった。

JT-60の初期OH実験では、15~1360Åの波長範囲で同時に写真測定を行ない酸素、炭素、チタンなどが不純物として同定された。高イオン温度モードでは、17~77Åの波長範囲で測定を行ない、上記の不純物の他に高電離のモリブデンのスペクトル線が観測された。炭素化後の実験においては、15~55Åの波長域で測定を行ない、チタンなどの金属の混入が少なくなった事が確認できた。

これらの真空紫外域での不純物スペクトル線の同定結果により、JT-60の不純物挙動解析の基礎データとして、不純物の同定、光電測光の場合にどのスペクトル線に着目するかについての広い視野を得ることが可能となった。また、高イオン温度モードでは、34価以上の高電離のモリブデンのスペクトル線が同定できる可能性があり、これは原子物理学的にも非常に興味深いので、今後更に検討を進めていきたいと考えている。

謝 辞

本報告書を終わるにあたり、準備段階より種々の議論及び助力を頂いた竹内浩氏、船橋昭昌臨界プラズマ計測室室長、田村早苗臨界プラズマ研究部部長、吉川允二那珂研究所所長に感謝します。また、原子分子データ利用に際しご助力頂いた核データ・センター白井稔三氏、中井洋太原子分子研究室室長に感謝します。最後に、JT-60装置の運転に関し、JT-60実験チームの諸氏に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 杉江達夫, 久保博孝, 逆井章他, 核融合研究, 特集/JT-60における計測 59 (1988) 157
- 2) 逆井章, 小出芳彦, 久保博孝他, 核融合研究, 特集/JT-60における計測 59 (1988) 169
- 3) 久保博孝, 杉江達夫, 逆井章他, 核融合研究, 特集/JT-60における計測 59 (1988) 189
- 4) 赤岡伸雄, 久保博孝, 杉江達夫他, JAERI-M 87-054, (1987)
- 5) JT-60チーム, JAERI-M 86-173 (1986)
- 6) JT-60チーム, JAERI-M 87-113 (1987)
- 7) JT-60チーム, JAERI-M 88-063 (1988)
- 8) 杉江達夫, 久保博孝, 逆井章他, JAERI-memo 61-237 (1986)
- 9) R. L. Kelly and L. J. Palumbo, NRL Report 7599 (1973)
- 10) K. Mori, W. L. Wiese, T. Shirai et al., ADNDT 34 (1986) 79
- 11) T. Shirai, K. Mori, J. Sugar et al., ADNDT 37 (1987) 235
- 12) T. Shirai, Y. Nakai, K. Ozawa et al., J. Phys. Chem. Ref. Data 16 (1987) 327

表1 初期OH実験の分光写真測定のパラズマ・パラメーター (E 000975 ~ E 001020)

プラズマ配位	ショット数
ダイバーター	18
リミター	15

全ショット数	33
正常放電	19
全露光時間	90.4 秒

プラズマ電流	ショット数
~ 0.3 MA	8
0.5 MA	12
0.7 ~ 0.85 MA	10
1.0 MA	3

表2 高イオン温度モード実験の分光写真測定のパラズマ・パラメーター (E 003976 ~ E 004001)

プラズマ配位	ショット数
リミター	26
ダイバーター	0

プラズマ電流	ショット数
1.0 MA	13
1.5 MA	9
2.0 ~ 2.3 MA	4

加熱	ショット数
OH	3
NBI	6
NBI + LH	10
NBI + IC	3
NBI + LH + IC	4

全ショット数	26
正常放電	20
全露光時間	243 秒

表3 第1壁の炭素化後の実験の分光写真測定のパラメーター(E 005379~E 005439)

プラズマ配位	ショット数
リミター	50
ダイバーター	0

プラズマ電流	ショット数
~ 1.0 MA	8
1.5 MA	21
2.0 ~ 2.4 MA	7
2.5 ~ 2.8 MA	14

加熱	ショット数
OH	25
NBI	21
NBI + IC	3
NBI + LH	1

全ショット数	50
正常放電	32
全露光時間	454秒

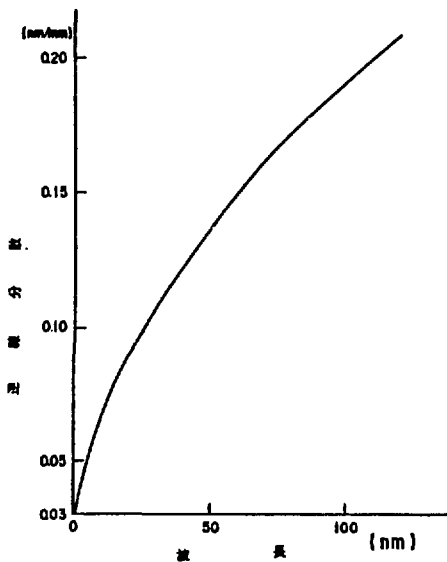


図1 測定に用いた斜入射分光器のローランド円に沿った逆線分散と波長の関係

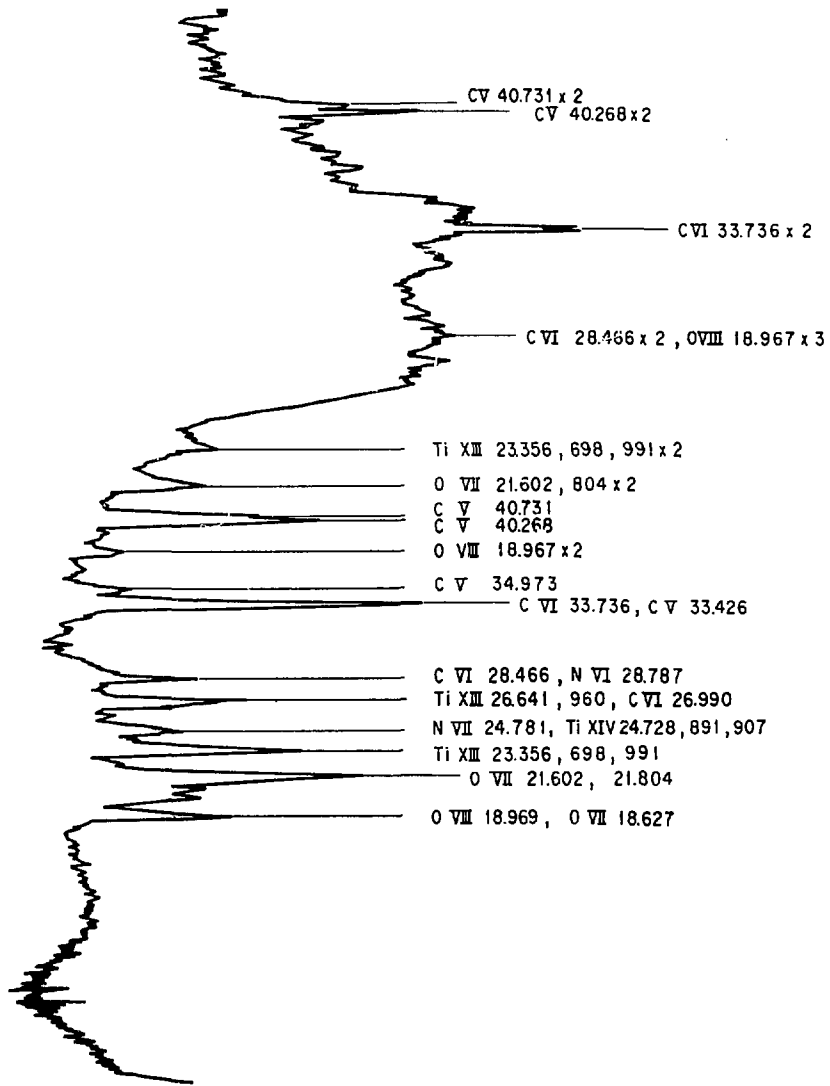


図 2.1 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (5~90 Å, ×1)

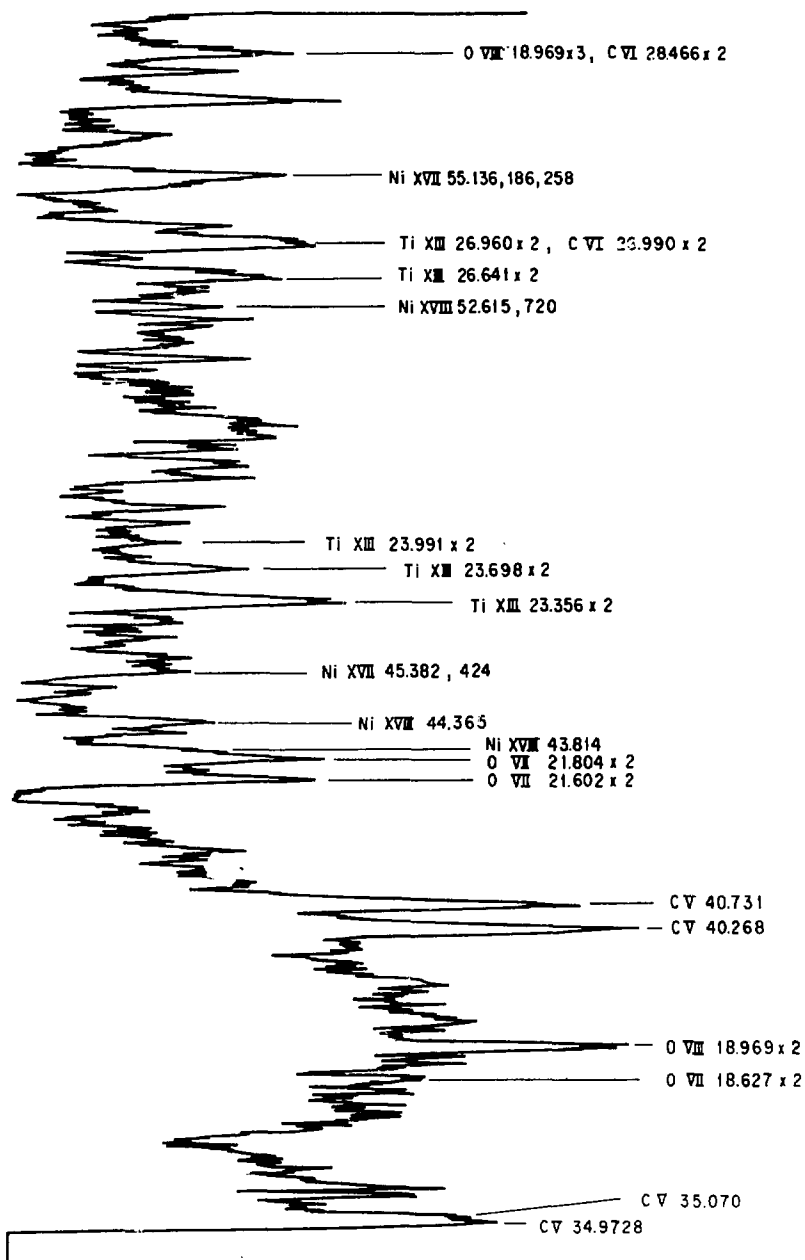


図 2.2 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (35~57 Å, ×5)

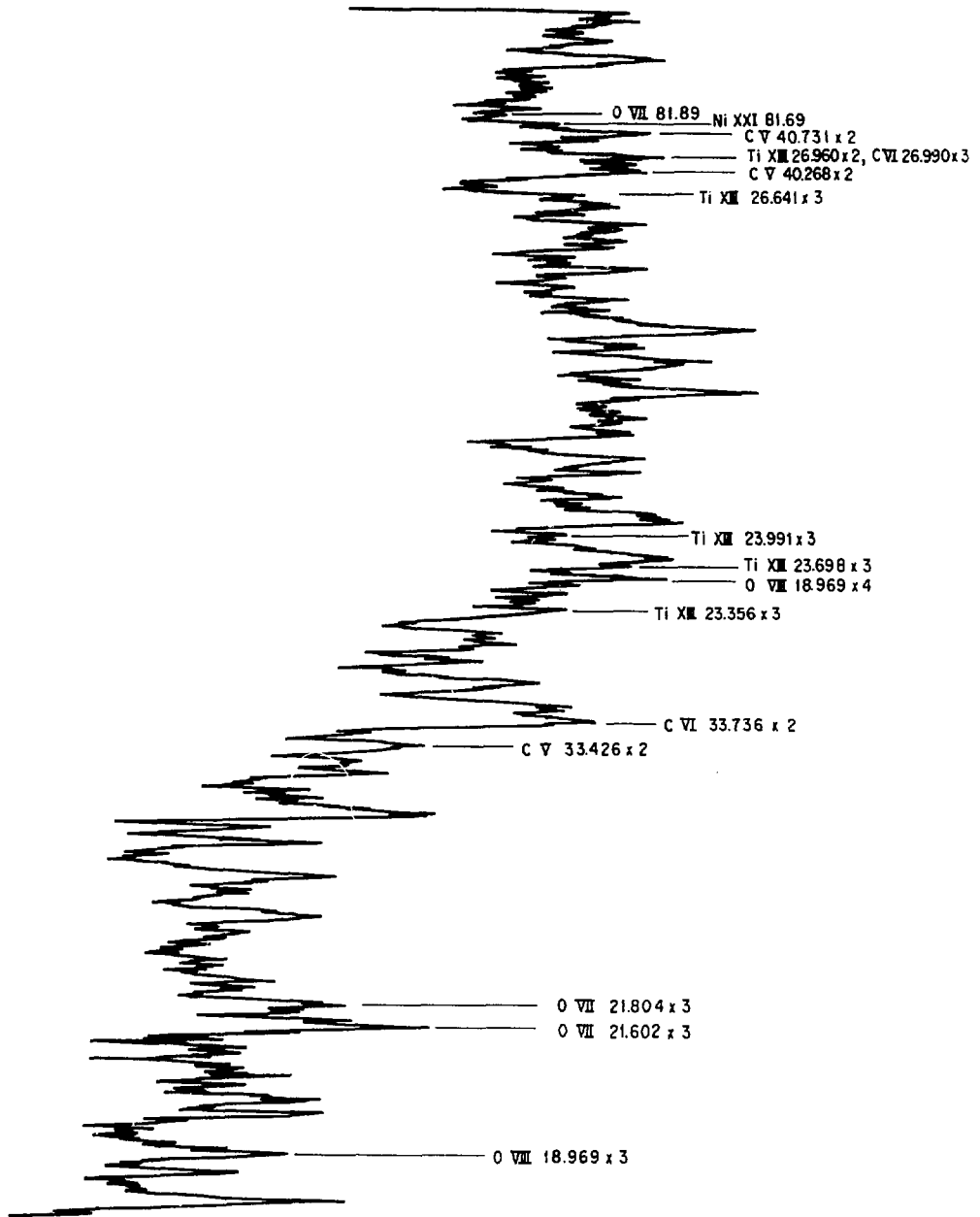


図 2.3 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (5~84 Å, ×5)

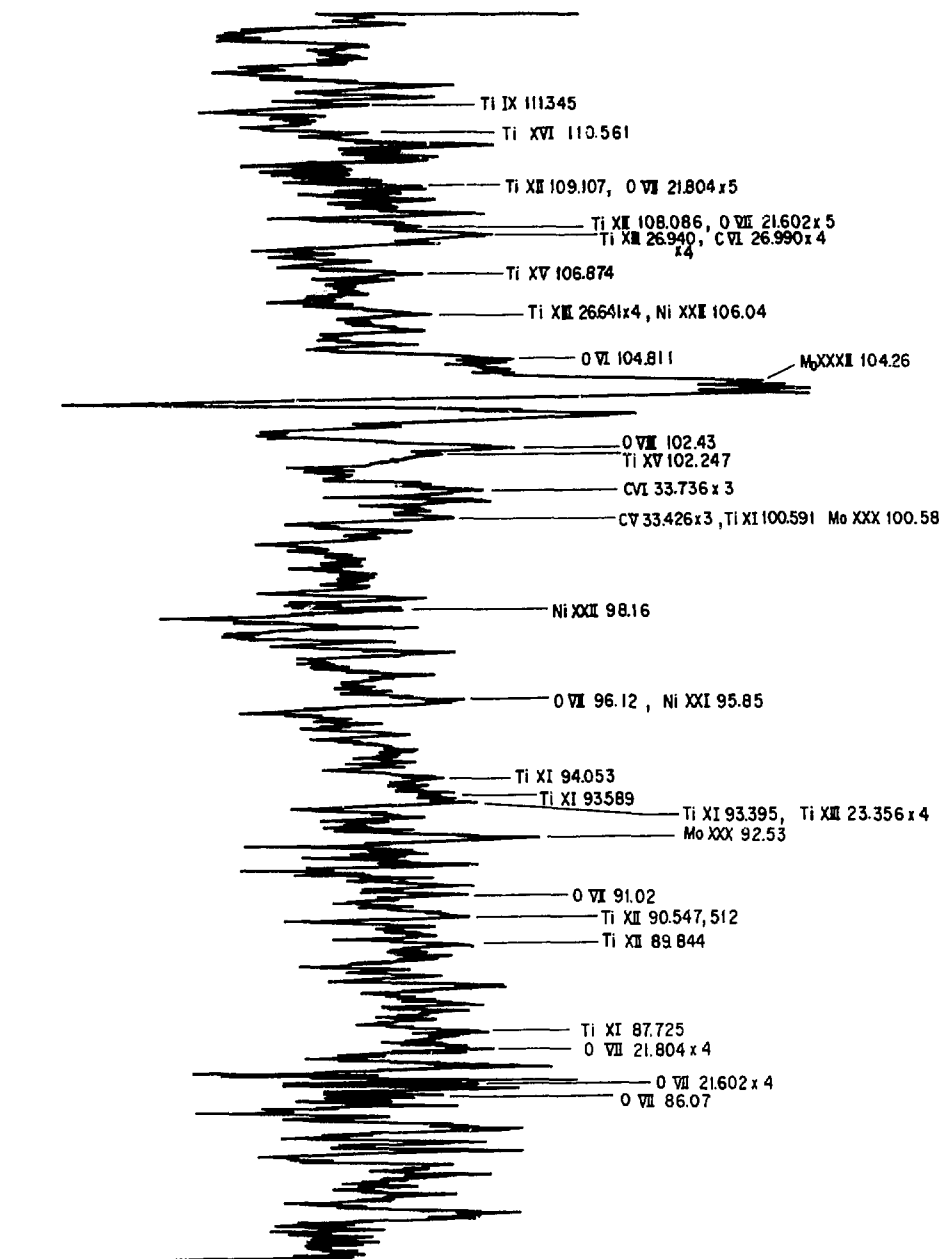


図 2.4 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (82 ~ 113 Å, × 5)

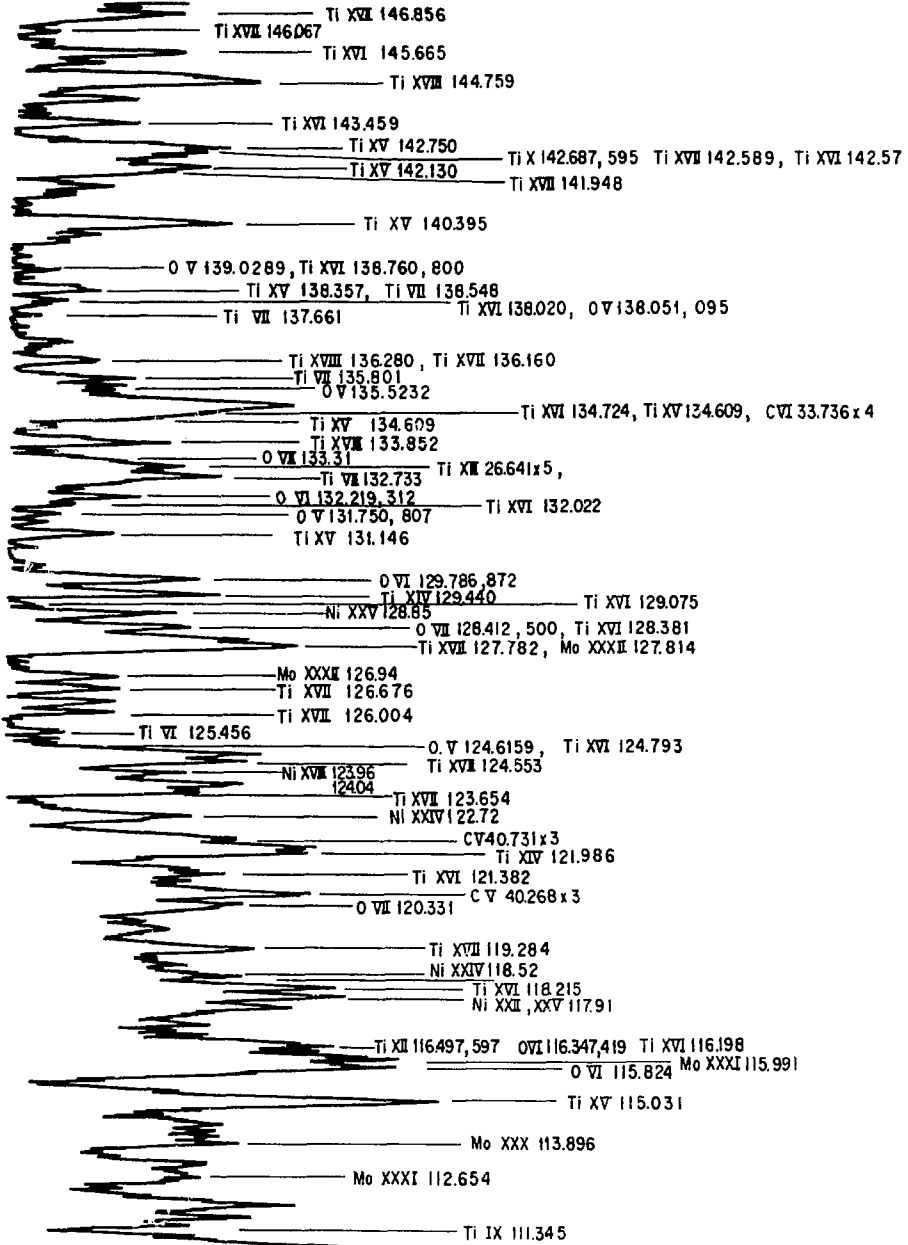


図 2.5 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果(110~147 Å × 5)

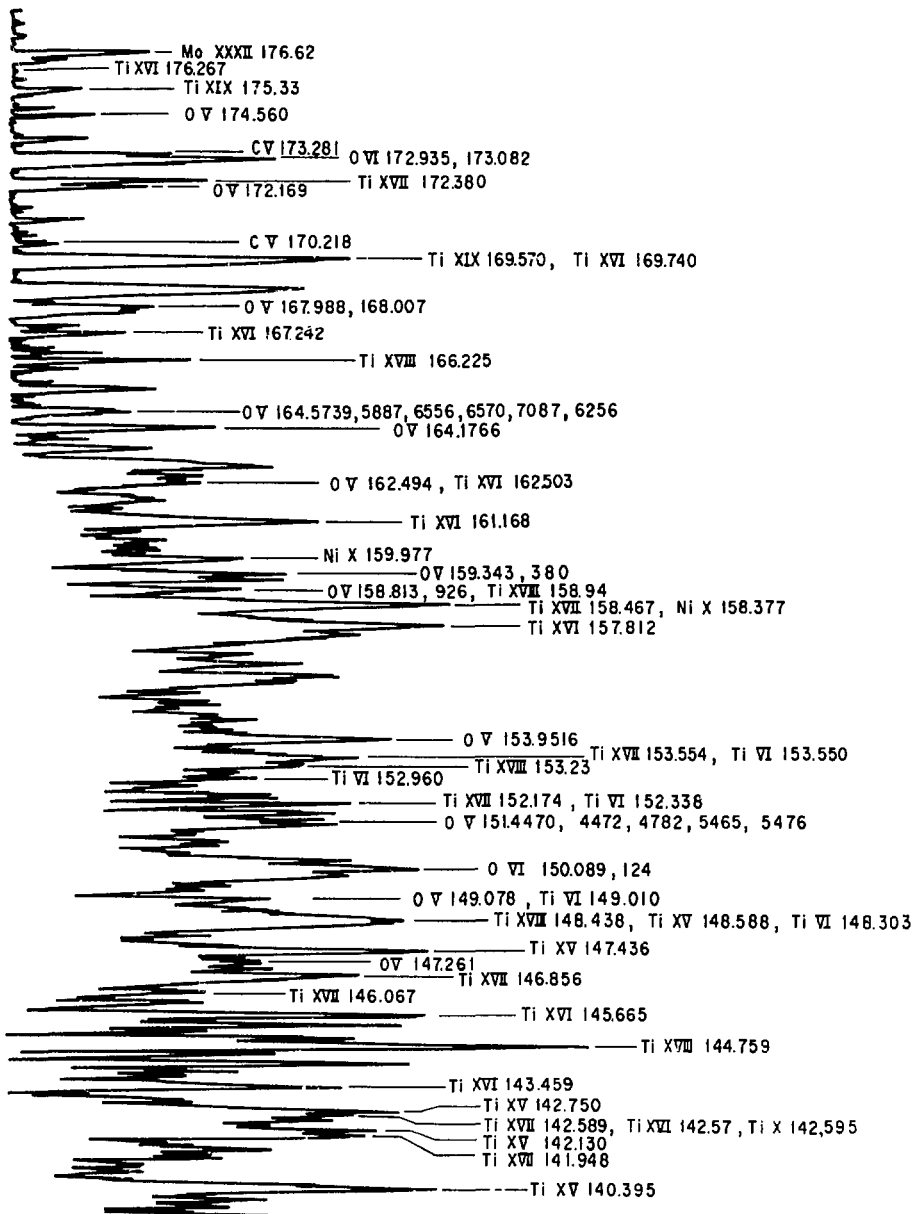


図 2.6 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果(140~177 Å × 5)

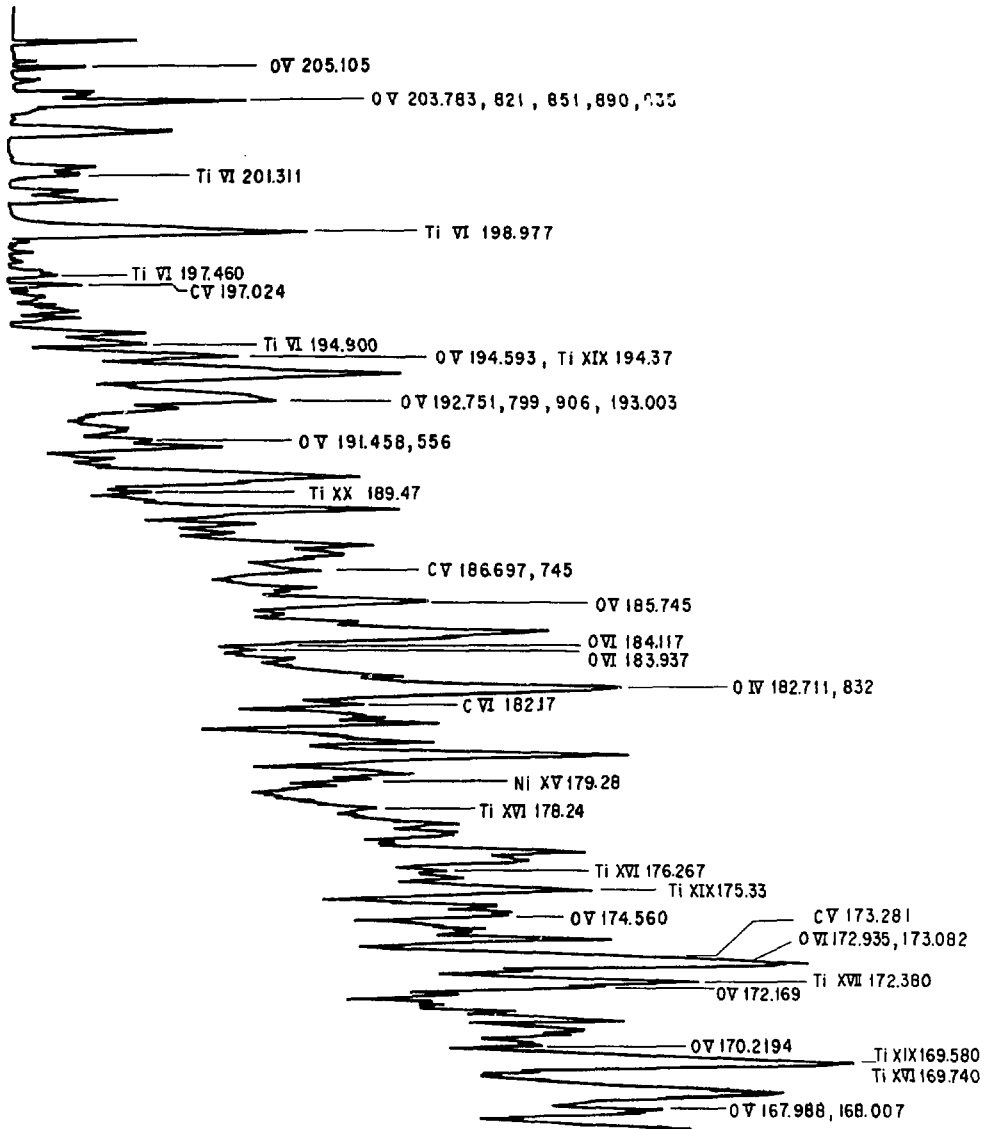


図 2.7 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果(167 ~ 207 Å × 5)

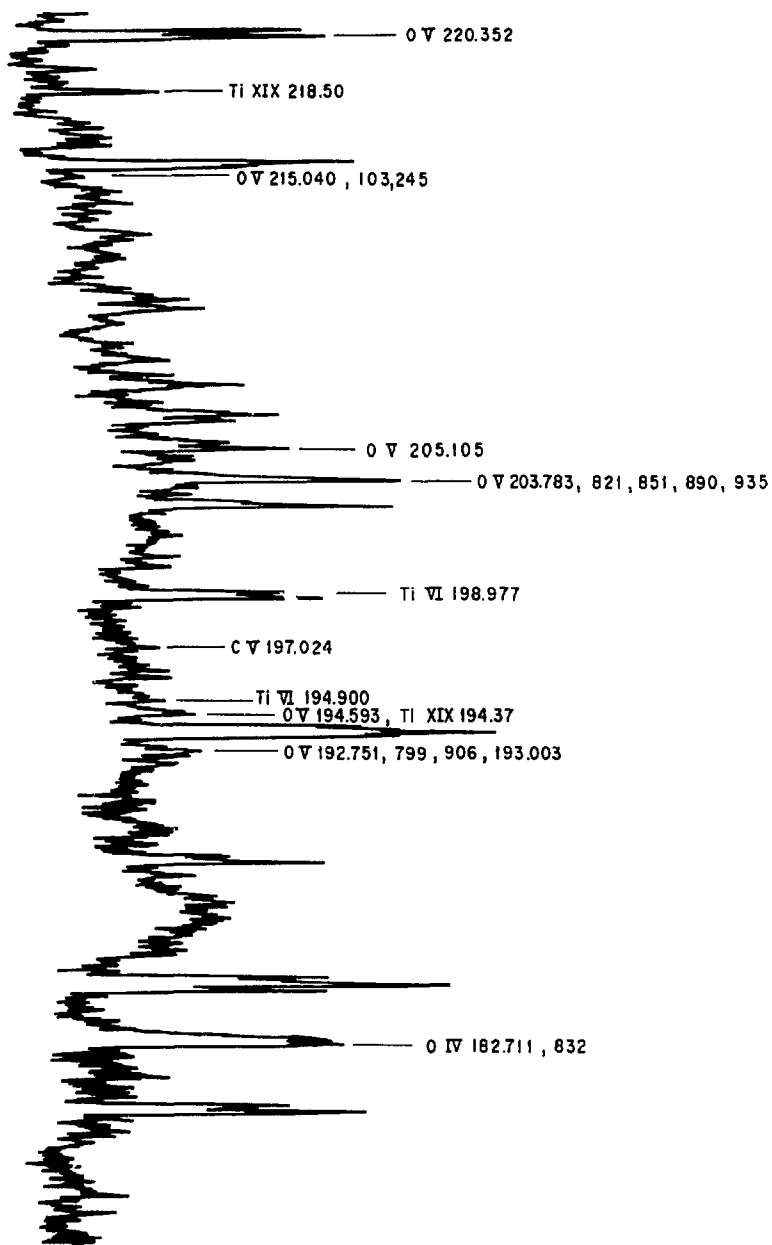


図 2.8 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果(175 ~ 221 Å × 5)

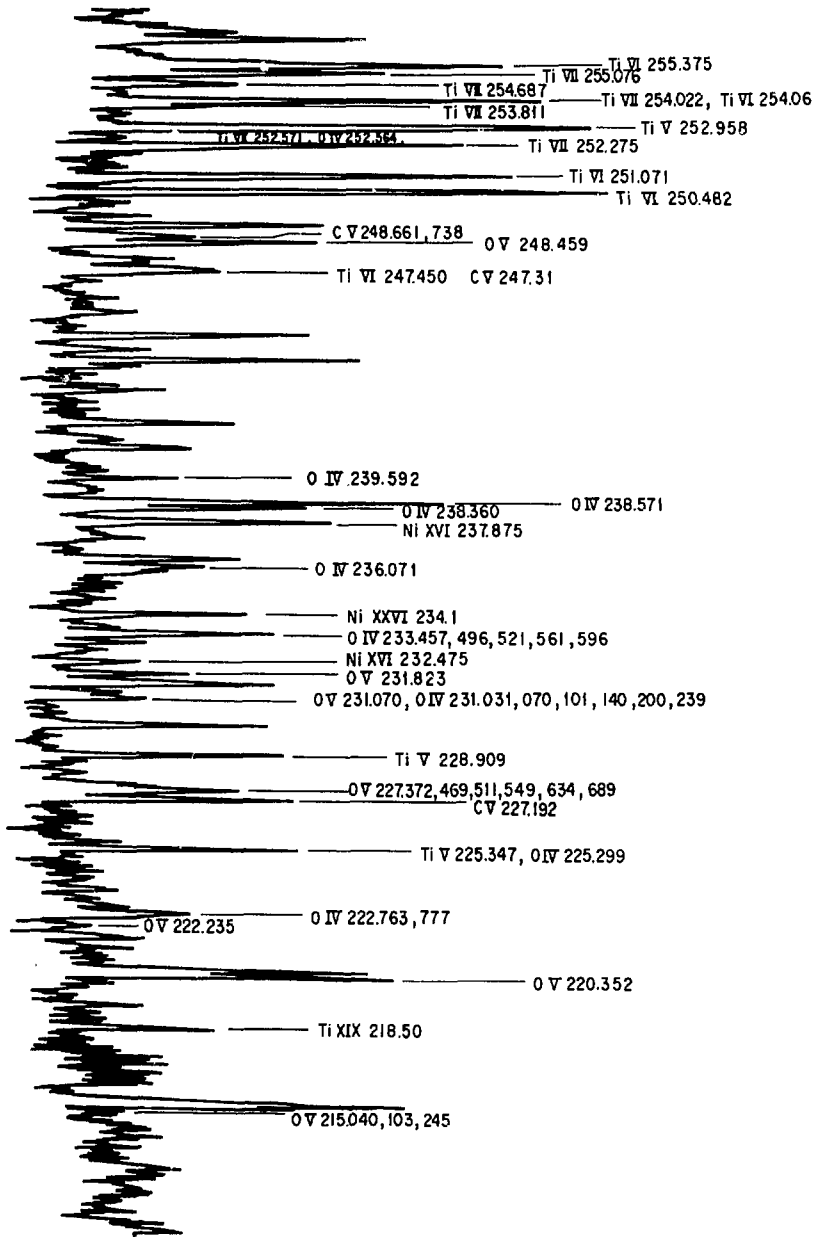


図 2.9 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォトリースと同定結果(210 ~ 257 Å × 5)

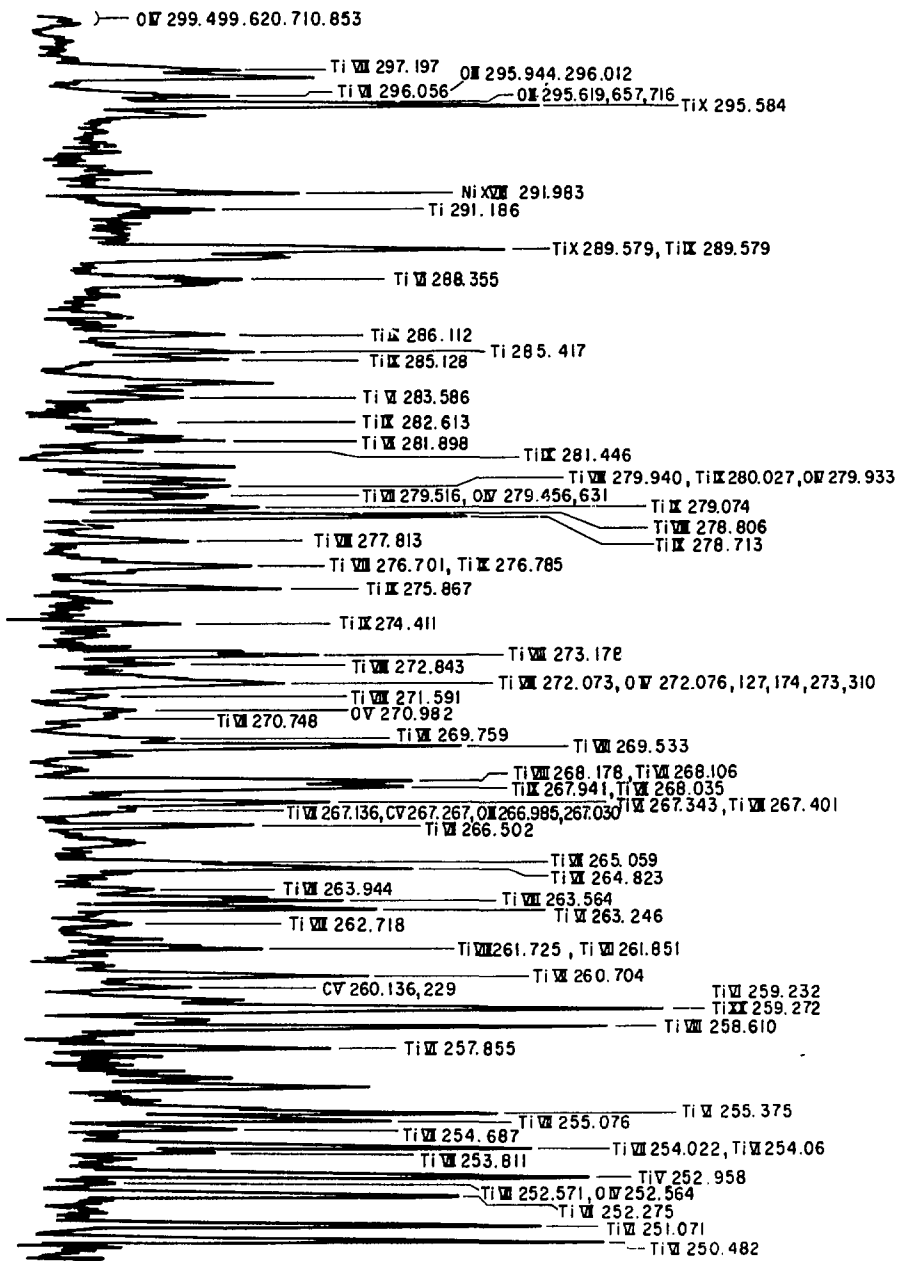


図 2.10 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (250 ~ 300 Å, × 5)

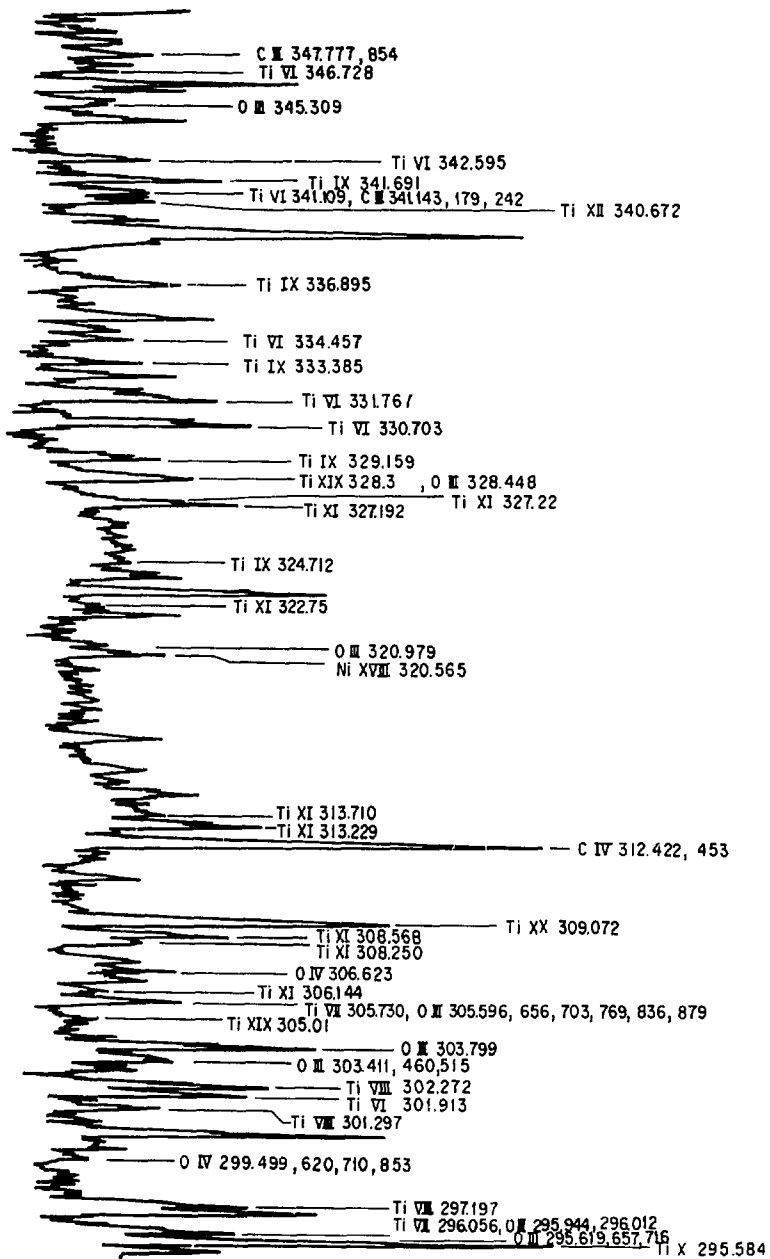


図 2.11 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (295 ~ 350 Å, × 5)

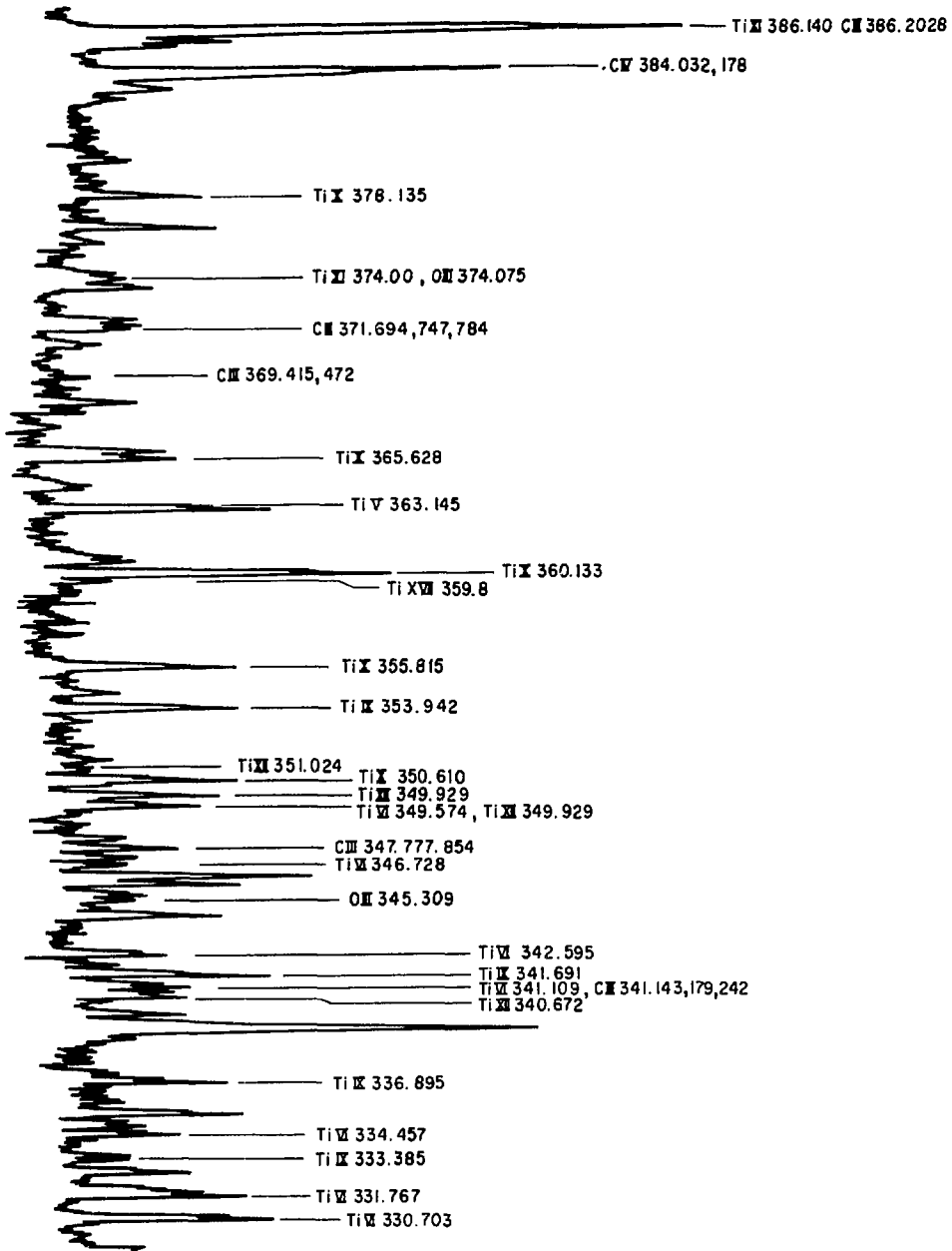


図 2.12 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (330 ~ 387 Å, × 5)

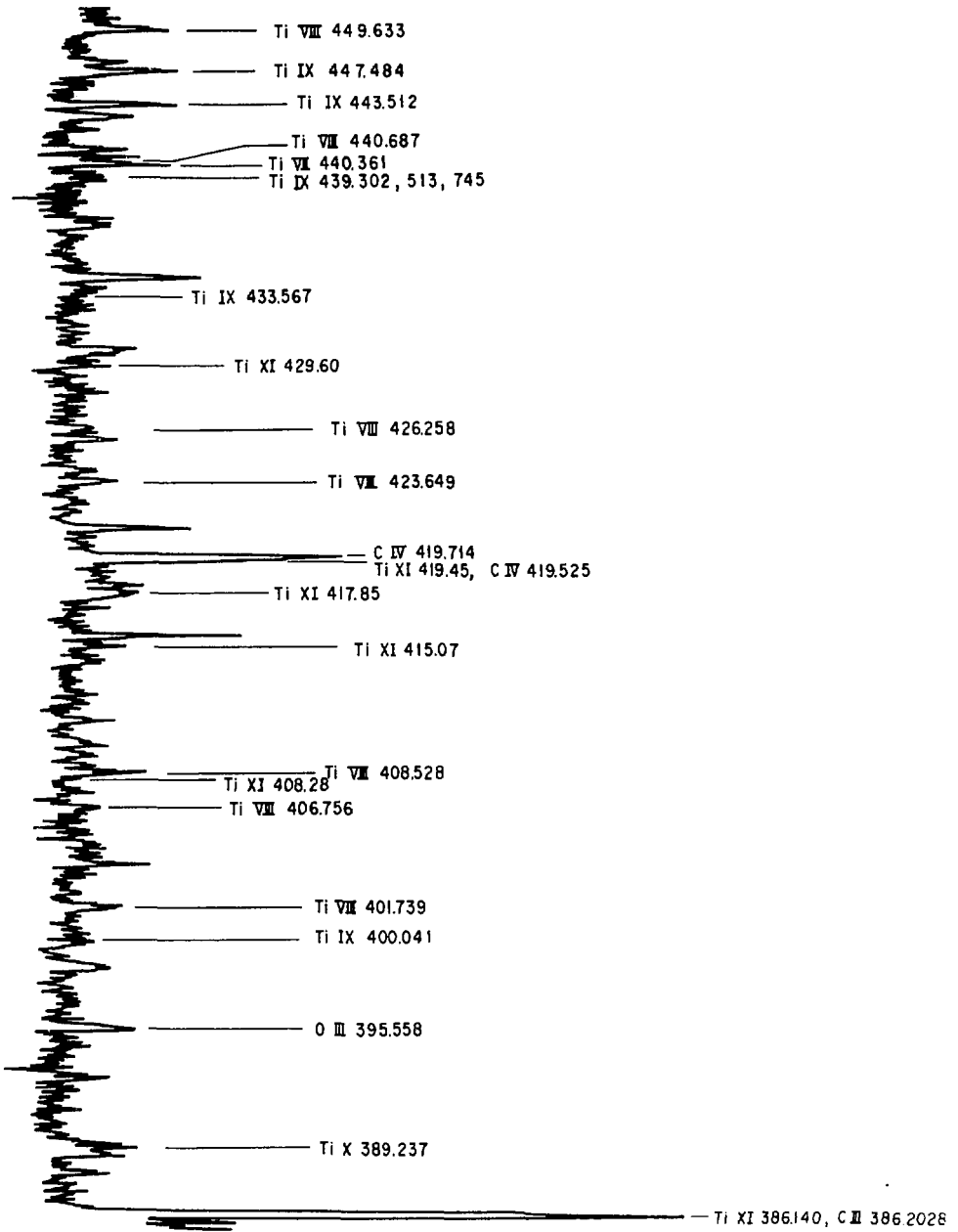


図 2.13 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (385 ~ 450 Å, × 5)

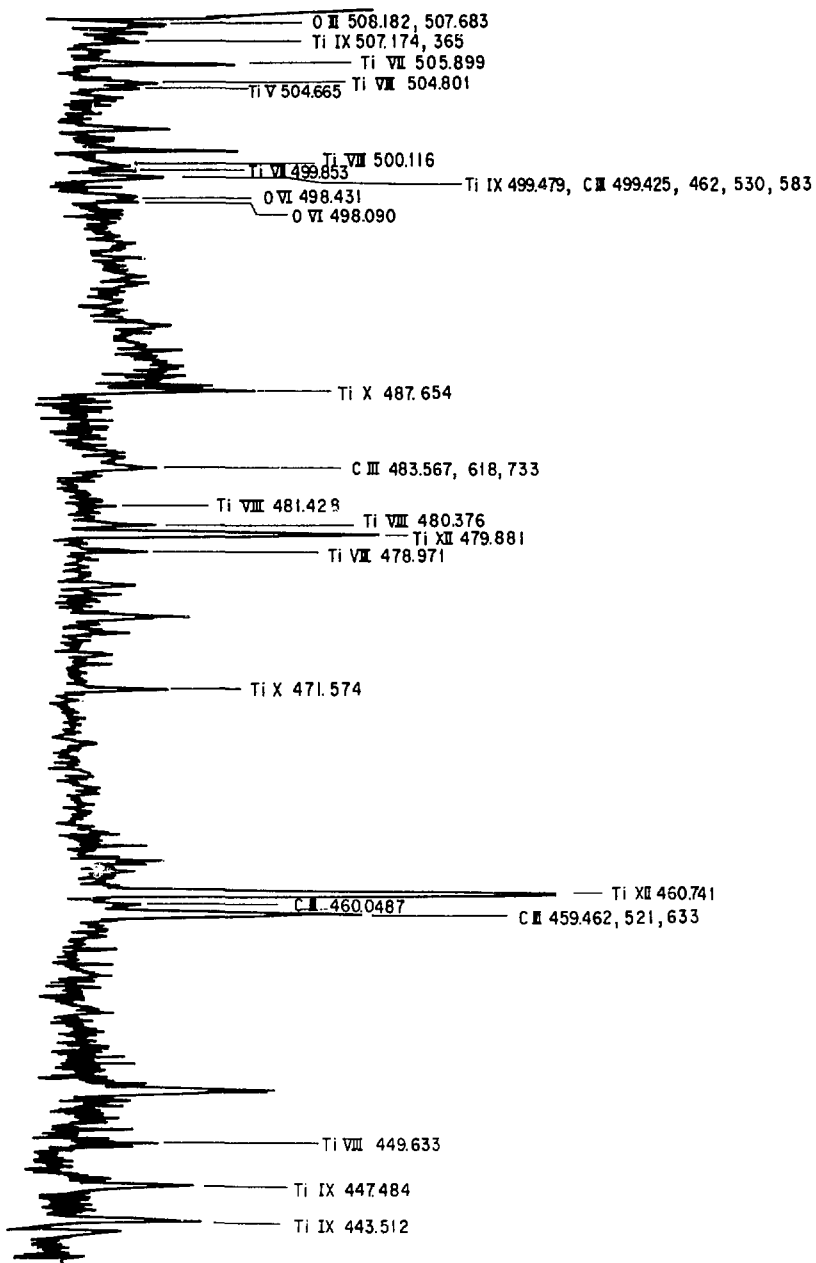


図 2. 14 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (440 ~ 509 Å, × 5)

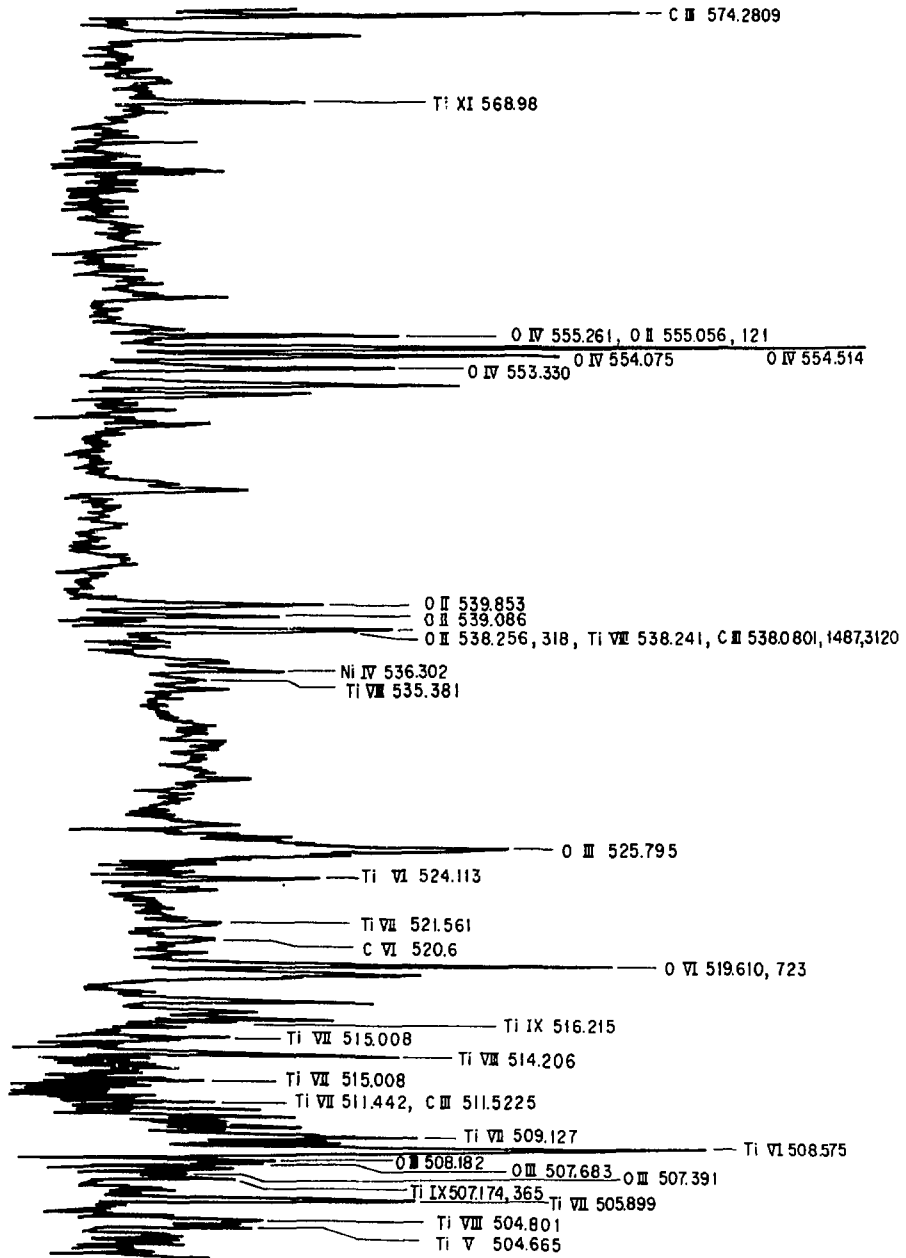


図 2.15 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (503 ~ 575 Å, ×5)

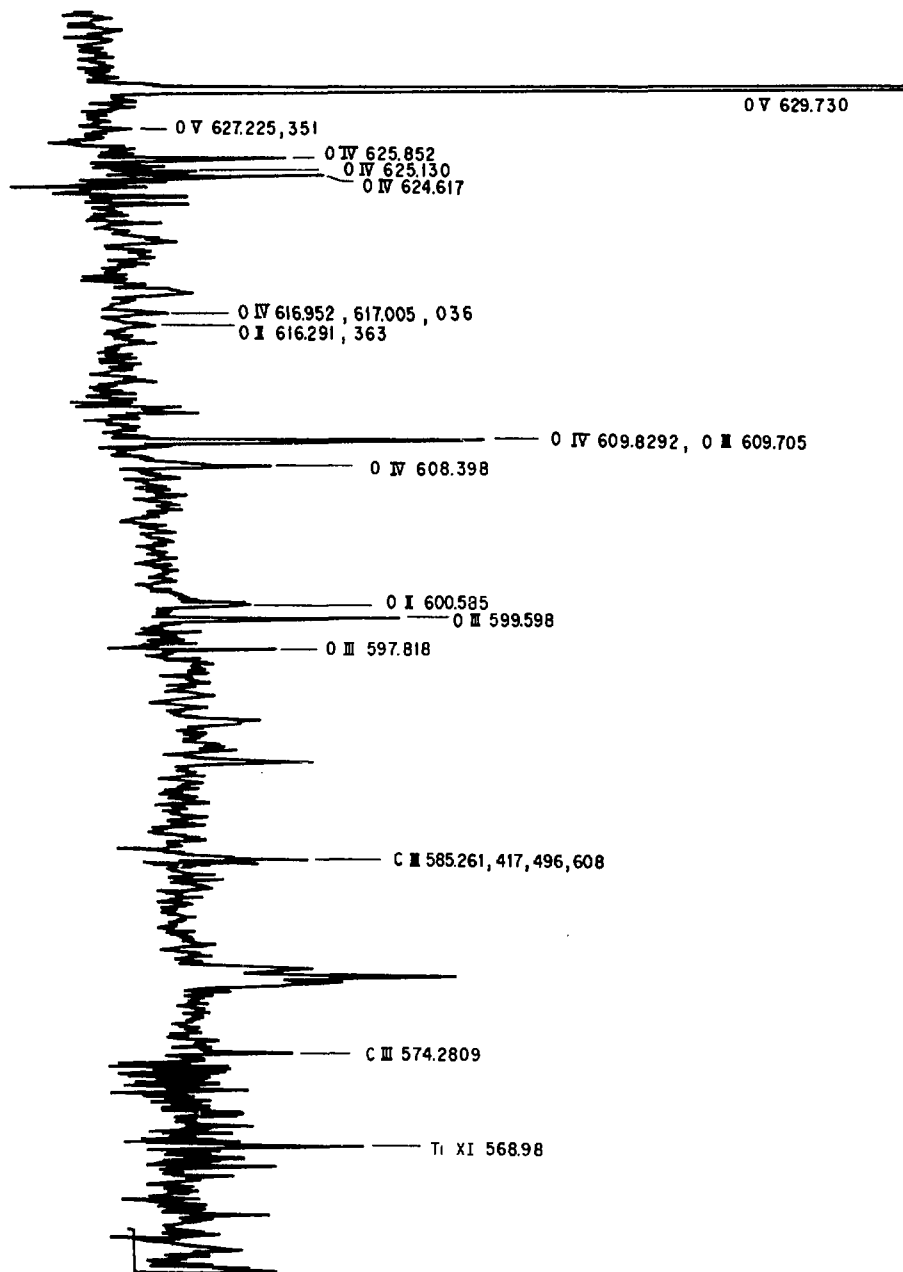


図 2.16 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (561 ~ 630 Å, × 5)

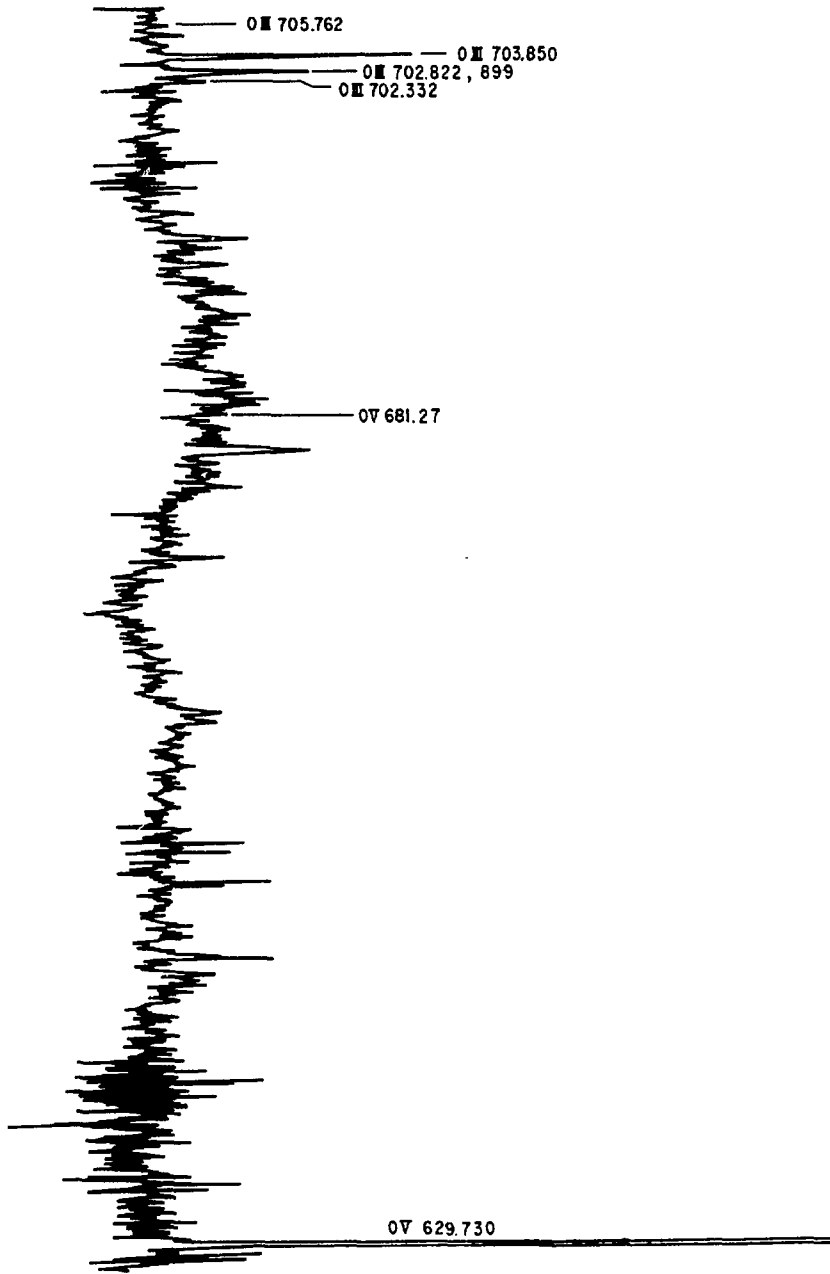


図 2.17 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (629~706 Å, ×5)

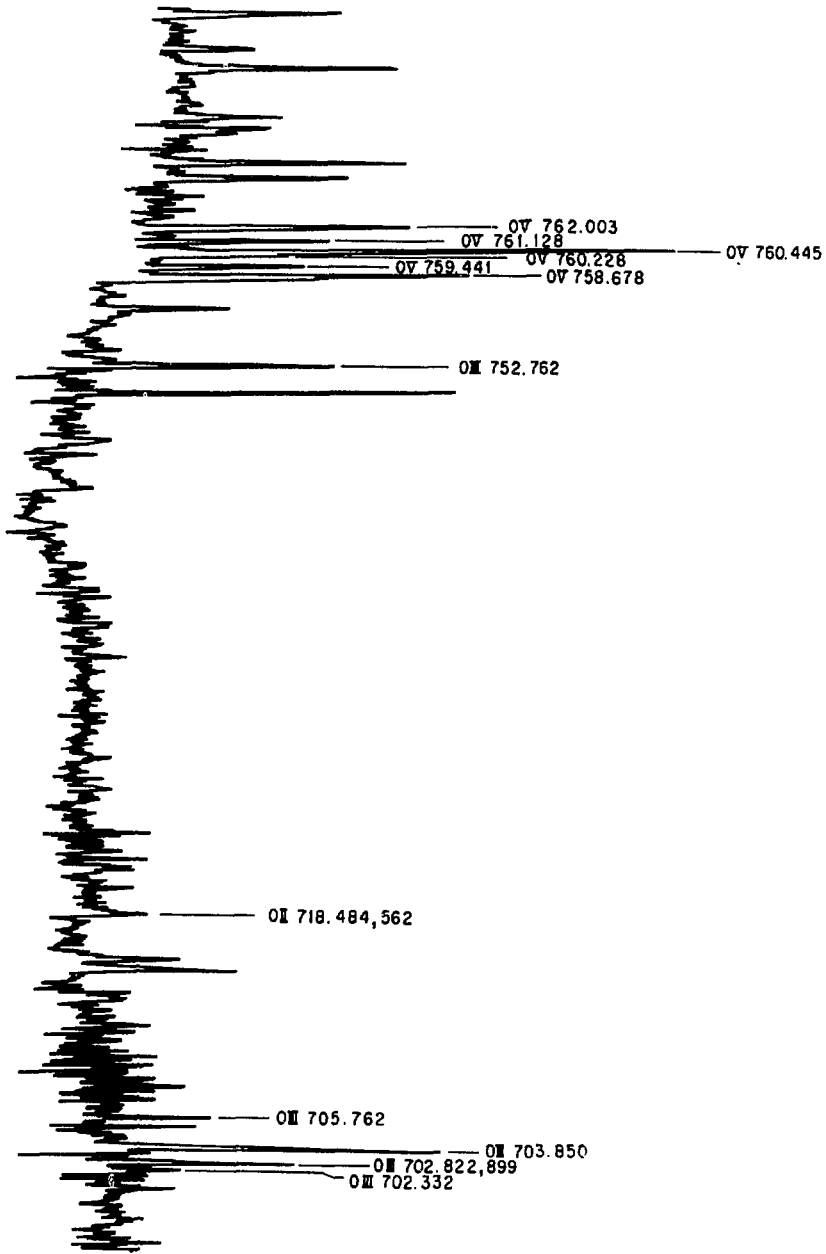


図 2.18 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (700 ~ 775 Å, × 5)

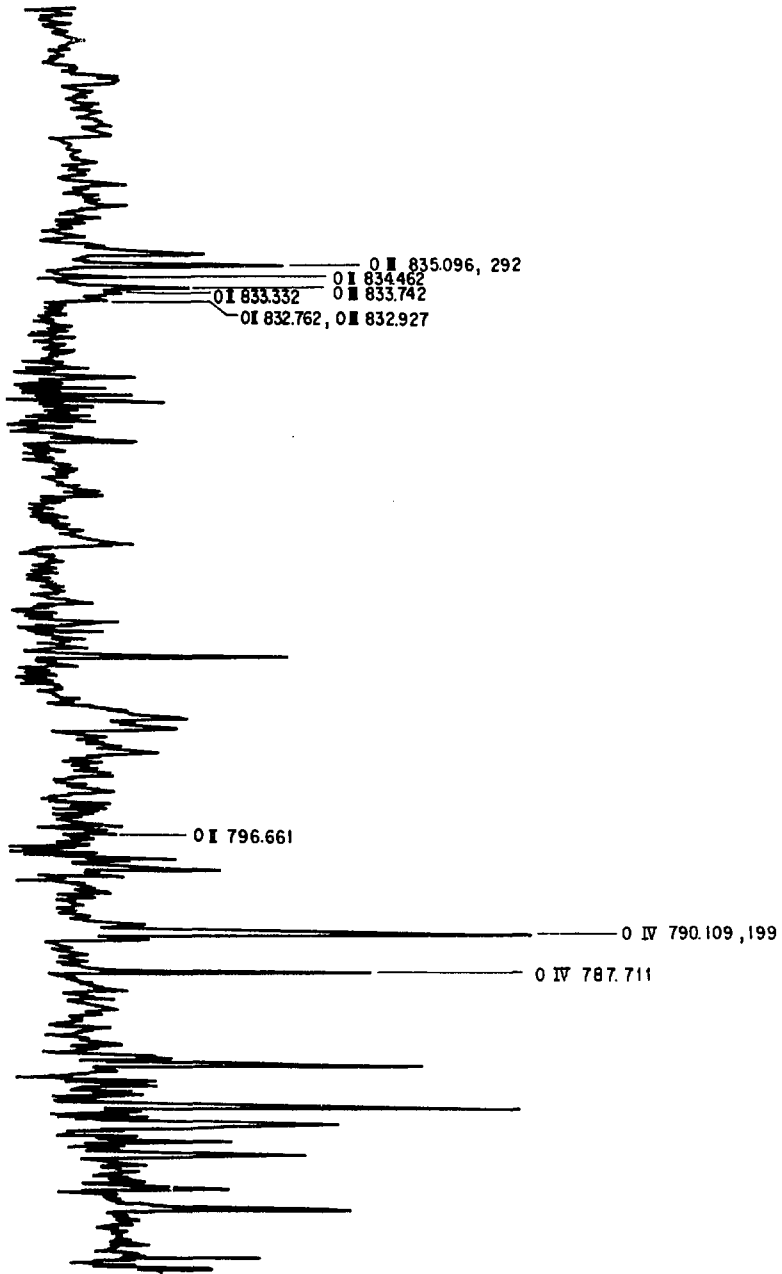


図 2.19 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (770 ~ 855 Å, × 5)

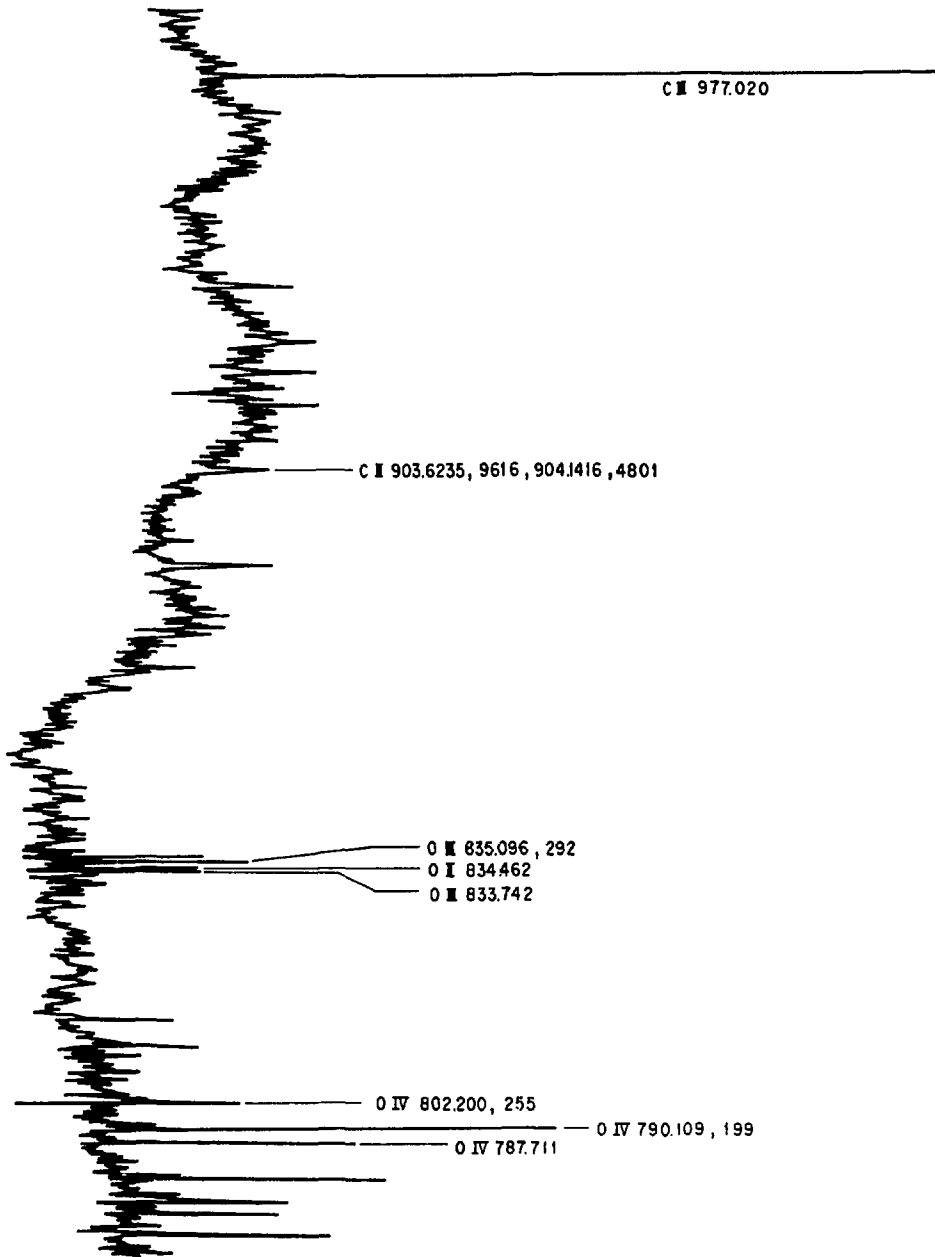


図 2.20 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (745 ~ 990 Å, × 2)

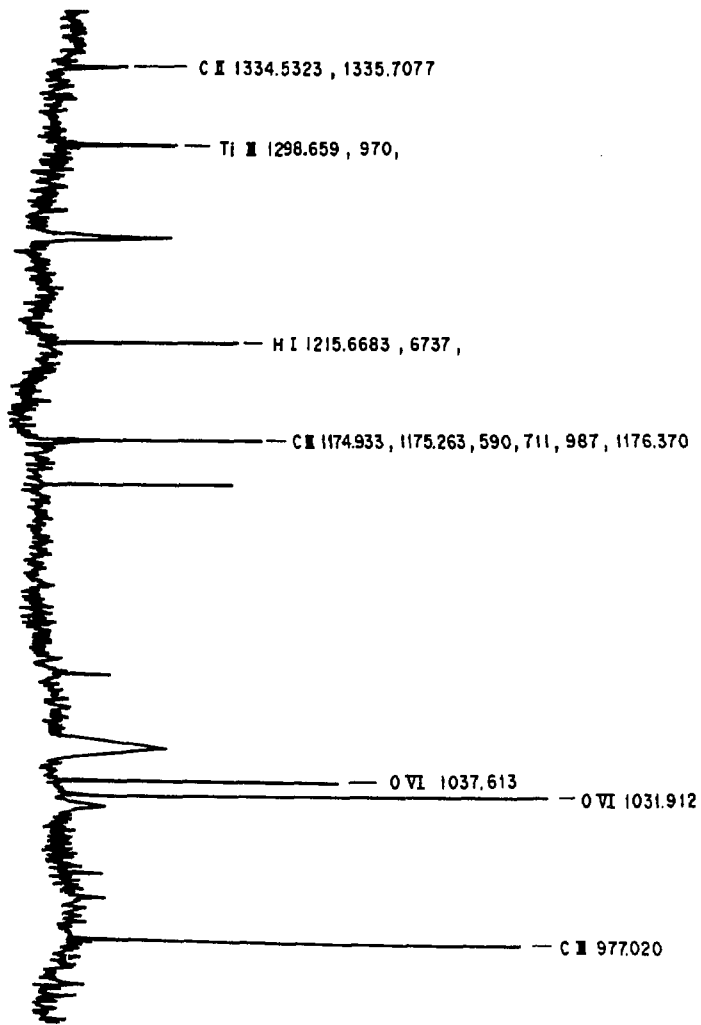


図 2.21 初期OH実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (945 ~ 1360 Å, × 1)

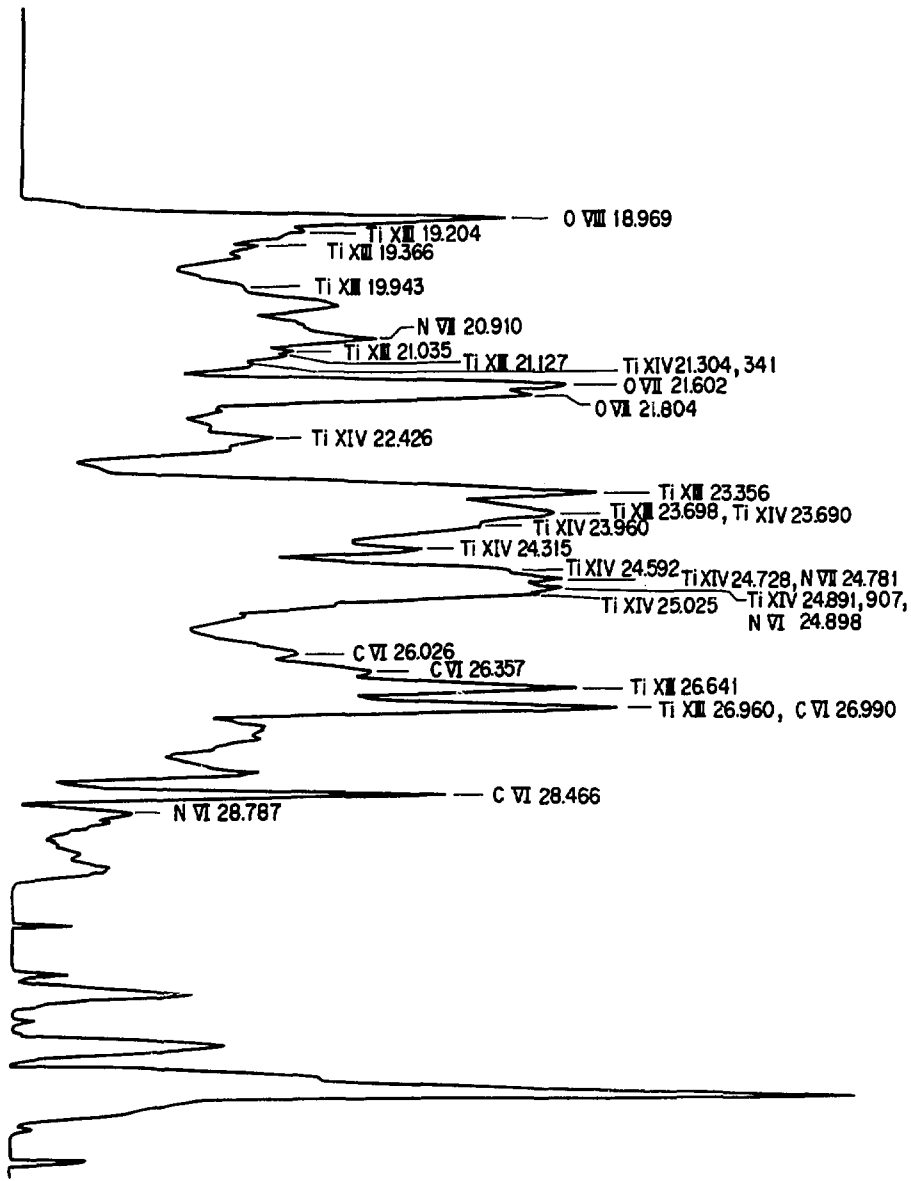


図 3.1 高イオン温度モード実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (17 ~ 35 Å, × 5)

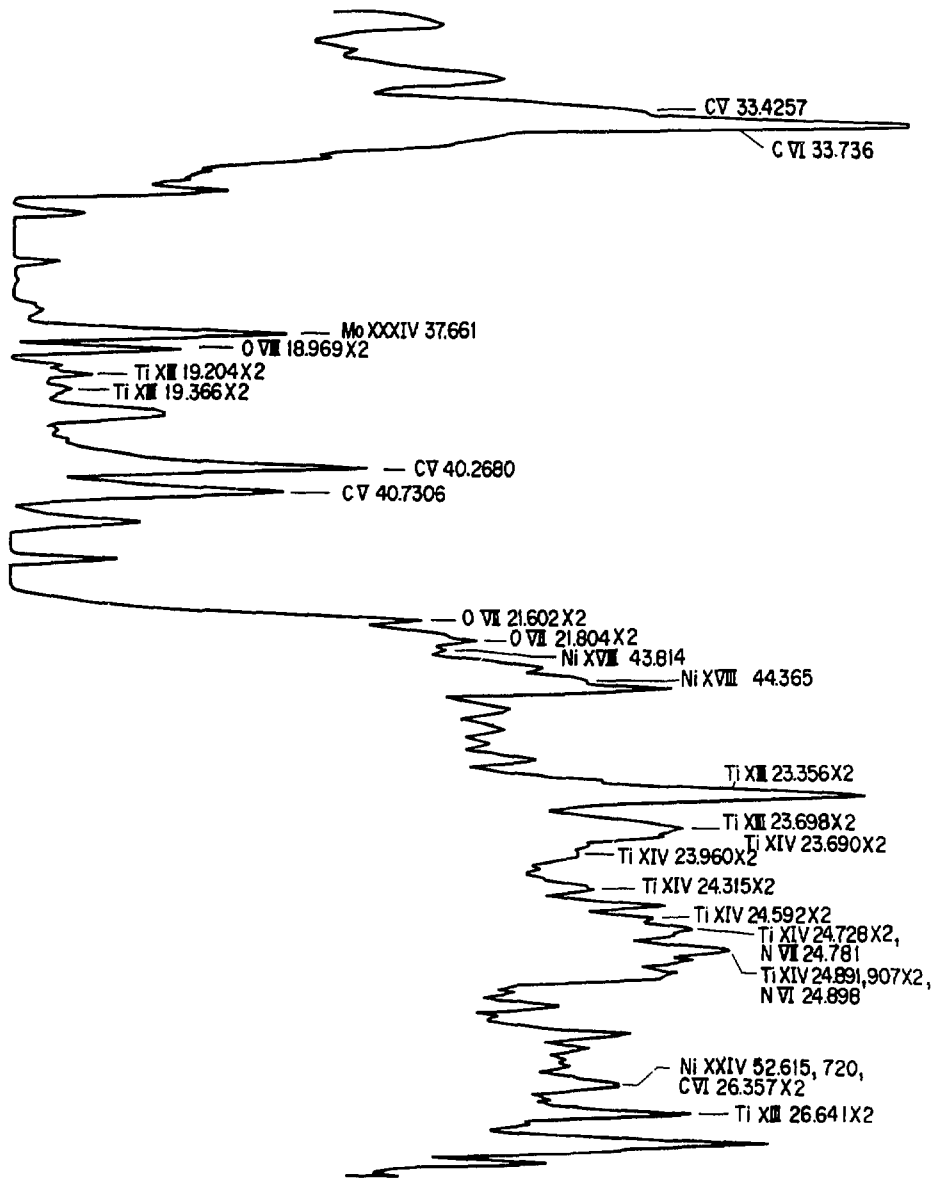


図 3.2 高イオン温度モード実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (31 ~ 55 Å, × 5)

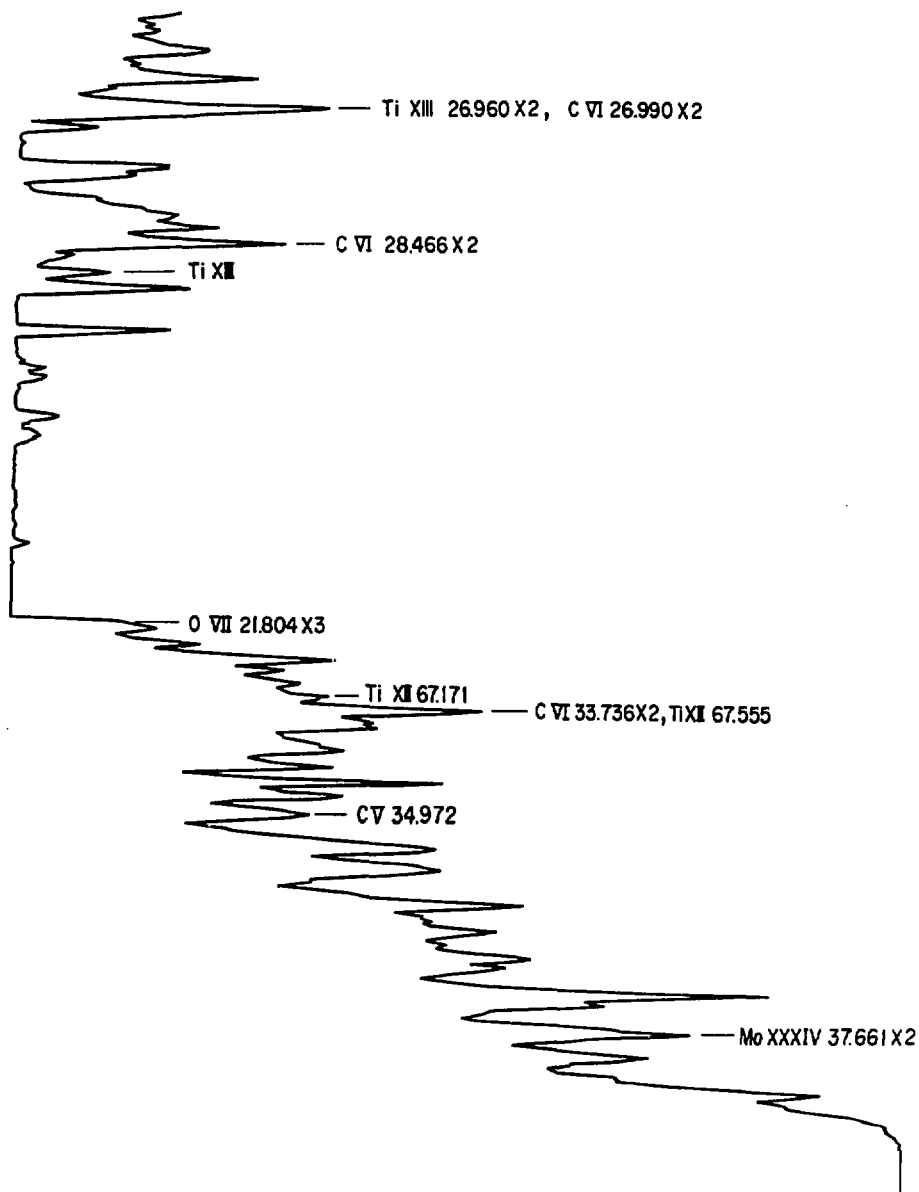


図 3.3 高イオン温度モード実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (52 ~ 77 Å, ×5)

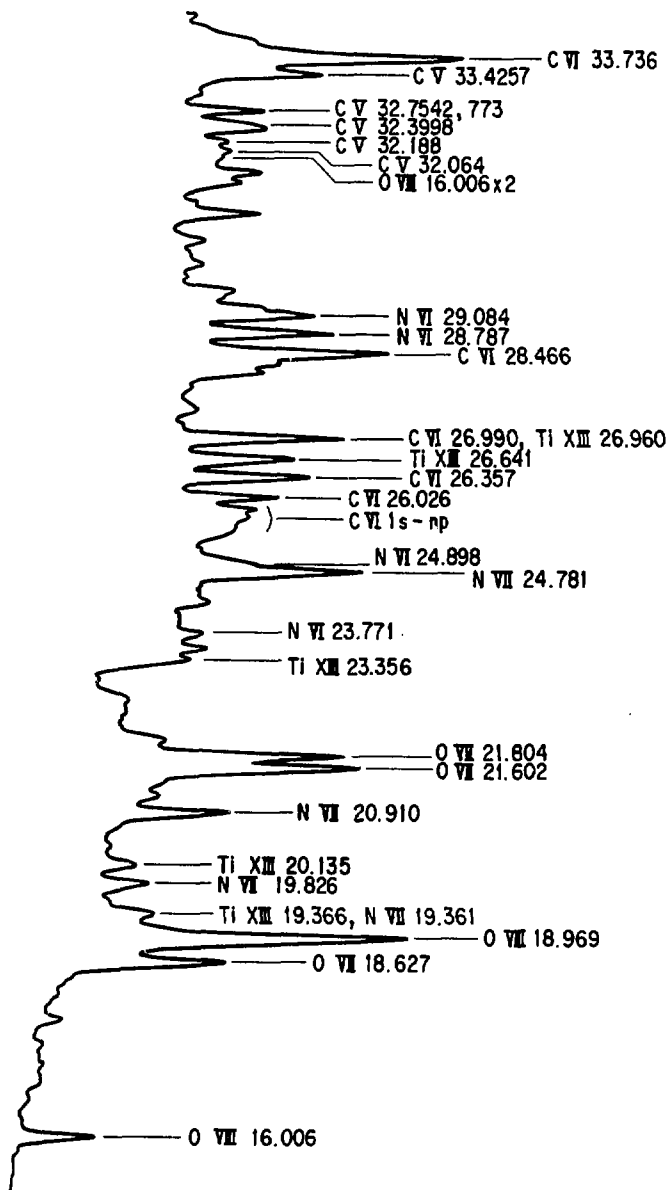


図 4.1 第 1 壁の炭素化後の実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (15 ~ 34 Å, × 5)

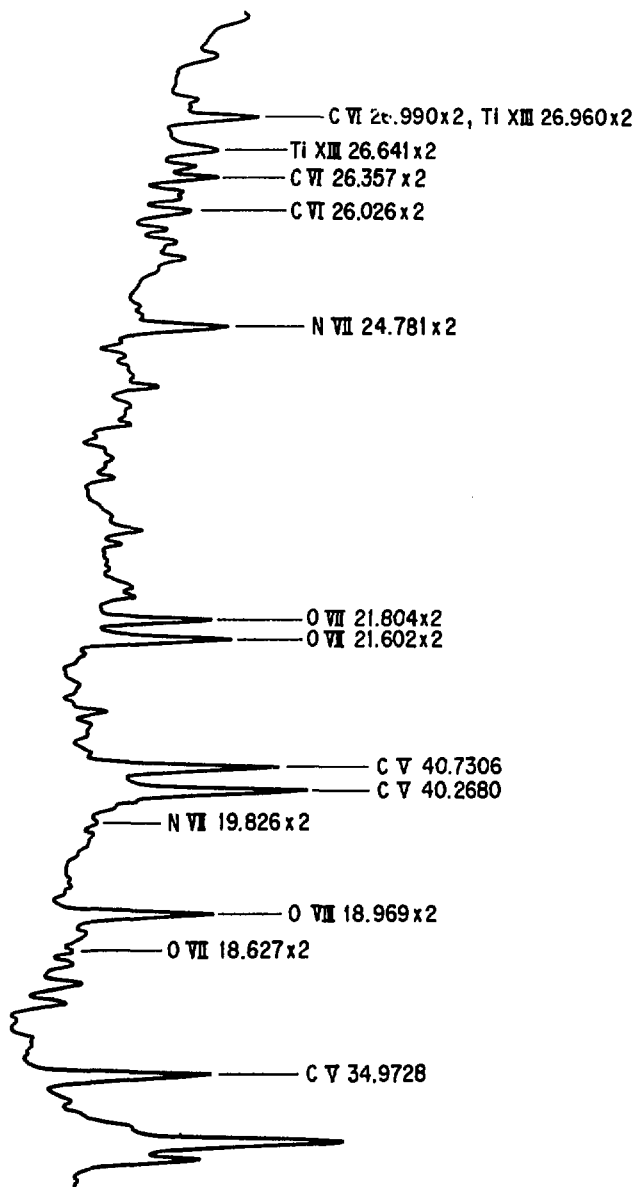


図 4.2 第1壁の炭素化後の実験の分光写真のマイクロ・フォト・トレースと同定結果 (33 ~ 55 Å, × 5)