

# 博士論文

## レーザー生成プラズマを用いた 高輝度紫外可視光源の点灯性向上と 事業戦略に関する研究

光産業創成大学院大学

光産業創成研究科

松本 直哉

2018年6月





## 要旨

### レーザー生成プラズマを用いた 高輝度紫外可視光源の点灯性向上と事業戦略に関する研究

本論文は、光関連の電子部品・機器メーカーX社に所属する筆者が行った、新しい高輝度紫外可視光源であるターゲット方式レーザー生成プラズマ光源の基礎技術に関する研究、その成果を用いた世界初の実用的な光源装置の開発、及びこの新しい光源装置の半導体検査装置市場における持続的競争優位性を高めるための事業戦略に関する研究の成果をまとめたものである。

筆者の所属企業における現在のミッションは、半導体検査装置市場に対し、新しい技術に基づいた従来よりも高輝度な紫外可視光源を提供し、半導体検査技術の進歩に貢献することである。このため、従来よりも高輝度となるレーザー生成プラズマを用いた光源装置の開発とその事業化を進めている。レーザー生成プラズマは、レーザーの照射強度を増すことが容易であるため、より高いパワー密度をより小さい領域に供給することができ、高温で小さいプラズマが生成可能である。よって、より低温で大きい放電プラズマを利用した従来のキセノンランプと比べて、格段に放射輝度が高い。この特長を利用した製品が近年上市されており、注目されている技術である。しかし、これらの製品で使われている技術も発光封体の耐圧限界のために高輝度化が上限に達しつつあり、今後の高いレベルの市場ニーズを十分満たせないことが予想されている。

そこで、本研究では、他の方式のレーザー生成プラズマ光源と比べて発光封体の耐圧が高いために封入ガス圧を高くでき、更なる高輝度化が可能という特長を持つターゲット方式に着目した。一方でターゲット方式はこれまで、点灯用ターゲットの点灯性と耐久性が十分に検討されておらず、点灯時に kW 級の大型レーザーが必要であり、かつ点灯毎に点灯用ターゲットの交換が必要である、という 2 つの課題を持っていた。これらの課題の原因は、①レーザー波長、②ターゲット構造、③ターゲット材料、それぞれの選択にある。よって本研究では、これらの選択について検討し、ターゲット方式において 100 W 以下のレーザーパワーによる繰り返し点灯の実現、市場要求に応えた半導体検査装置用高輝度紫外可視光源の開発、及び更なる点灯性向上のための技術的指針の獲得を目的とした。

これに対して本研究では新たに、①ターゲット材料に対する光の吸収率が高いレーザー波長の選択、②耐久性が高く加熱効率の良いターゲット構造の考案、及び③点灯性の良いターゲット材料の発見により、最小出力 35 W の小型レーザーによる繰り返し点灯を実現した。①ではレーザー波長の 10.3  $\mu\text{m}$  から 1  $\mu\text{m}$  帯への短波長化により、ターゲット材料の吸収率を高めた。

②ではターゲット構造をワイヤー状から円柱状への変更により耐久性を向上させ、ヒートダム構造の採用により熱損失を低減した。③では、材料の融点と仕事関数に着目し、バリウム含浸タングステンをターゲット材料として使用することにより、従来のタングステン製のターゲットと比べて 1/3 以下の低いレーザーパワーで点灯できることを実験的に見出した。

さらに、未解明であった本方式のプラズマ点灯のメカニズムについて、分光分析や高速度画像解析により、レーザーによるターゲット加熱によって放出された易電子放出物質が、さらにレーザーパワーを吸収することによって電子を放出し、それがキセノン原子をプラズマ化させているという一つの仮説を提案した。点灯性を評価した各ターゲット材料の定量的な測定結果とこの仮説から、点灯にはターゲットから放出される易電子放出物質の融点と仕事関数のいずれも低いことが重要であると推測される。これにより、今後の更なる点灯性向上のための技術的指針を獲得した。

これらの成果を用いて世界初の実用的なターゲット方式レーザー生成プラズマ光源（以下、本光源）装置の開発に成功した。分光放射輝度については、75 W キセノンランプと比べて 20 倍以上、近年上市された他の方式のレーザー生成プラズマ光源製品と比べて 2 倍以上を得た。装置サイズについては、顧客ニーズに合わせて小型化した。光出力安定性については、高安定なキセノンランプと同等の 0.2% (peak to peak) 以下の特性を得た。これらは目標とした顧客セグメントの要求をすべて満足している。

次に、開発した本光源の半導体検査装置市場における持続的競争優位性を高めるために、事業戦略を立案した。この市場の動向を調査・分析し、本光源についてリソース・ベースド・ビューとポジショニング・ビューの両方の視点で戦略を立案できる 3×3 のマトリックスによる SWOT 分析を実施し、二つの戦略が導き出された。一つは、主に X 社の高い技術開発力と顧客との強い関係性という内部の強みと外部要因から導き出された、「X 社のみにより市場の一部を確保する」という戦略である。もう一つは、前述の戦略に加えて、主に X 社の体制と競合企業の強い特許技術という内部の弱みと外部の脅威から導き出された、「競合企業との業務提携や M&A により市場全体を確保する」という戦略である。これらの事業戦略をより具体化するためにビジネスモデルキャンバスを作成し、二つの戦略のそれぞれの持続的競争優位性の有無と有効な市場範囲を検討した。その結果、後者の戦略において、開発した光源の半導体検査装置市場における持続的競争優位性を確保できる戦略であることが確認された。

本研究は、これらの研究開発と事業戦略の立案を通して、光産業機器に關しての技術的な研究開発による製品開発と、市場情報などの分析による事業戦略の立案の一つのプロセスを学術的に示した。これは今後、レーザー生成プラズマ光源の他市場への展開や他の光源技術に基づく事業戦略の立案に際しても活用できる。この点において、本研究は光産業創成に貢献するものである。

## **Abstract**

### **Improvement in ignition performances and research of strategies for developing a high-brightness ultraviolet to visible light source using laser-induced plasma**

This thesis summarizes results of the author's research and development for an optoelectronics company X, and mainly focuses on following aspects:

- Basic research on a novel high-brightness ultraviolet to visible light source for use with a target-type laser-induced plasma light source and the development of a light source using this technology.
- Design of business strategies concerning this light source to enhance its sustainable competitive advantage in a market of semiconductor inspection equipment.

An important mission of the author in the company X is advancement of semiconductor inspection technology by providing a novel ultraviolet to visible light source for use with a target-type laser-induced plasma light source having higher brightness and longer lifetime than conventional xenon lamps. This leads a development and commercialization of an advantage light source using laser-induced plasma technology.

Target-type laser-induced plasma can easily achieve a considerably high plasma temperature when it is supplied with a substantially high power density because a gas pressure limit of these glass bulbs is higher than that of other-types laser-induced plasma. Therefore, the plasma source can achieve considerably higher brightness than xenon lamps or other-types laser-induced plasma light sources. Products based on this technology have been launched recently by competitors of the company X and have attracted attention; however, these products are also reaching the upper limit of their luminance due to the bulb's pressure limit. Consequently, it is expected that they will not be able to continue satisfying high-level market requirements in the future.

Therefore, this study focused on the target-type plasma that can have increased brightness as the bulb reaches its pressure limit. To date, previous research on the target-type plasma has not sufficiently studied the ignition performance or durability of repeatable ignition. Two issues thus remain unresolved: (a) the target-type plasma requires a kW-class large laser during ignition and (b) it is necessary to change the target each time the ignition process is performed.

The causes of these issues are associated with selections of (a) a laser wavelength, (b) a target structure, and (c) a target material. Therefore, this research investigated the aforementioned selections to achieve the following: i) success of repeatable ignition of the target-type plasma at a laser power of 100 W or lower, ii) development of high-brightness ultraviolet to visible light sources for semiconductor inspection equipment that responds to market demands, and iii) understanding technical guidelines for improving the ignition performance.

The findings of this research are summarized as follows: (1) selection of a laser wavelength with a high light absorption rate for the selected target material, (2) improvement in the target structure with higher durability and higher heating efficiency, and (3) achievement of repeatable ignition using a 35 W compact laser by identifying the target materials with a high ignition performance. For (1), the absorptive potential of the target material was increased by shortening the laser wavelength from 10.3 to 1  $\mu\text{m}$ . For (2), the target structure was changed from a wire shape to a cylindrical rod shape to improve durability, whereas heat loss was reduced by adopting a heat dam structure. For (3), by focusing on melting temperature and work function of target materials, it was experimentally confirmed that a barium-impregnated tungsten target can be ignited with a laser power of 1/3 or less in comparison with that required by a conventional tungsten target.

Furthermore, spectroscopic and high-speed image analyses in this study offered hypotheses concerning the mechanism of plasma ignition: electron-emitting materials are released by laser heating and these materials emit electrons by absorbing laser power in the xenon gas area, thereby transforming the xenon gas into a plasma. From quantitative measurements of each target material and evaluation of the ignition performance together with the hypotheses, their melting temperature and work function of the target material were found to be important in terms of ignition performance. These results constitute important technical guidelines for further improving the ignition performance in the future.

Based on these findings, the first practical target-type laser-induced plasma light source was developed. The spectral radiance of this light source is more than 20 times higher compared with 75 W xenon lamps and more than twice that of other laser-induced plasma light sources launched in recent years by competitor companies. The size of this light source was miniaturized to meet the customer requirements. The light output stability is better than 0.2% (peak to peak), equal to that of the xenon lamps. This satisfies all of the customer requirements.

Following this development process, business strategies were designed for this light source to enhance its sustainable competitive advantage in the market of semiconductor inspection equipment. Market trends were investigated and analyzed via a cross-SWOT analysis with a  $3 \times 3$  matrix that can formulate strategies in terms of resource-based view and positioning view, and then two strategies were derived. The first strategy involved securing a part of this market by company X independently. This strategy was mainly derived from the internal strength of high-technology development capabilities, and from the external factors of strong relationships with the customers. The second strategy involved making a business alliance or M&A with the competitor for securing the entire market in addition to the first strategy. This strategy was mainly derived from the internal weaknesses of structure of company X, and from the external threats of strong patent and technology of the competitor.

To clarify the possibility of sustainable competitive advantage and applicable area about these two business strategies in this market, were examined by a business model canvas tool. Consequently, the second strategy was confirmed to be capable of securing a sustainable competitive advantage in the semiconductor inspection equipment market.

This thesis academically appraises the process of product development from technical research and development on industrial photonics equipment as well as the design of business strategy. The findings can be applied to develop laser-induced plasma light sources for other markets and planning business strategies for these other technological markets in the future. In this regard, this thesis contributes to a creation of new photonics industries.

---

# 目次

<b>第 1 章 序論</b> .....	1
1.1. はじめに.....	1
1.2. 高輝度紫外可視光源の歴史.....	1
1.3. キセノンランプの用途と課題.....	4
1.4. レーザー生成プラズマ光源の可能性と課題.....	5
1.5. 本研究の目的と構成.....	9
<b>第 1 章の参考文献・引用</b> .....	1 2
<b>第 2 章 点灯性を向上したターゲット方式レーザー生成プラズマ光源の開発</b> .....	1 3
2.1. はじめに.....	1 3
2.2. 背景と課題.....	1 3
2.2.1. 点灯方式.....	1 3
2.2.2. ターゲット方式の先行研究と課題.....	1 5
2.2.3. 課題解決の方法.....	1 6
2.3. レーザー波長の変更とターゲットの形状の考案.....	1 7
2.4. ターゲット材料の点灯性評価.....	1 8
2.4.1. 仕事関数と融点に着目した材料の検討.....	1 8
2.4.2. 点灯性評価方法の考案.....	1 9
2.4.3. 点灯性評価の結果と考察.....	2 0
2.5. 点灯メカニズムの検討.....	2 2
2.5.1. 点灯プロセスにおけるエネルギーの流れ.....	2 2
2.5.2. ターゲット表面からの加熱による点灯の可能性.....	2 3
2.5.3. ガス領域のレーザー吸収による点灯の可能性.....	2 5
2.5.4. 点灯メカニズムの仮説.....	3 2
2.6. 装置の小型化.....	3 3
2.7. 開発した光源の仕様.....	3 4
2.8. 従来光源との仕様の比較.....	4 0

2.9. まとめ.....	4 2
<b>第 2 章の参考文献・引用.....</b>	<b>4 4</b>
<b>第 3 章 半導体検査装置市場の分析とレーザー生成プラズマ光源の 事業戦略の立案 .....</b>	<b>4 5</b>
3.1. はじめに.....	4 5
3.2. 戦略に関する先行研究.....	4 7
3.2.1. 戦略の定義に関する先行研究.....	4 7
3.2.2. 経営戦略の概観.....	5 0
3.2.3. 戦略の定義と先行研究のまとめ.....	5 8
3.3. 市場の動向と分析.....	5 9
3.3.1. 調査方法.....	5 9
3.3.2. 売上高、シェアの調査結果.....	5 9
3.3.3. 対象企業の比較.....	6 1
3.3.4. 製品ラインナップと新製品投入数の比較.....	6 1
3.3.5. 企業吸収合併・買収数の比較.....	6 2
3.3.6. 研究開発の結果の比較.....	6 3
3.3.7. サポート体制の比較.....	6 4
3.3.8. 半導体検査装置市場の分析.....	6 5
3.4. プレイヤーの戦略分析.....	6 6
3.4.1. A 社の戦略分析 .....	6 6
3.4.2. B 社の戦略分析 .....	7 0
3.4.3. C 社の戦略分析 .....	7 0
3.4.4. 3 社の分析結果のまとめ.....	7 1
3.5. 本開発光源の戦略.....	7 2
3.5.1. SWOT 分析による戦略立案 .....	7 2
3.5.2. ビジネスモデルキャンバスによる戦略立案.....	7 4
3.5.3. 戦略立案のまとめ.....	7 8
3.6. 実行された M&A 戦略.....	7 8
3.7. まとめ.....	7 9
<b>第 3 章の参考文献・引用.....</b>	<b>8 1</b>

---

<b>第4章 結論</b> .....	83
4.1. 研究目的と結果.....	83
4.1.1. 本章の目的.....	83
4.1.2. 本研究の目的.....	83
4.1.3. 方法.....	83
4.1.4. 本研究の結果.....	84
4.2. 結論.....	85
4.3. 光産業創成における本研究の意義.....	86
4.4. 今後の課題と展望.....	86

---

## 図表目次

図 1-1	19 世紀当時のカーボンアーク灯	1
図 1-2	キセノンランプ	3
図 1-3	キセノンランプの構造	3
図 1-4	キセノンランプのスペクトル	3
図 1-5	ムーアの法則に基づく半導体回路の微細化	5
図 1-6	レーザー生成プラズマの模式図	6
図 1-7a	レーザー生成プラズマ光源の模式図（放電方式）	7
図 1-7b	レーザー生成プラズマ光源の模式図（ターゲット方式）	8
図 1-8a	放電方式レーザー生成プラズマ光源の点灯方法	8
図 1-8b	ターゲット方式レーザー生成プラズマ光源の点灯方法	9
図 1-9	本論文の構成	1 1
図 2-1	放電方式の模式図（ランプ部）	1 4
図 2-2	封入ガス圧と相対輝度	1 5
図 2-3	先行研究の実施例（ターゲット方式のランプ部模式図）	1 6
図 2-4	ターゲット形状	1 7
図 2-5	点灯方式の模式図と実物写真	1 8
図 2-6	ターゲット方式レーザー生成プラズマ光源の点灯方法	1 8
図 2-7a	点灯性実験の模式図	2 0
図 2-7b	ターゲット部拡大図	2 0
図 2-8	入力パワーごとの点灯開始時間	2 1
図 2-9	点灯時のエネルギーの流れ	2 3
図 2-10	入力パワー毎のレーザー集光点温度推移のシミュレーション結果	2 4
図 2-11	入力パワー毎の点灯時レーザー集光点温度のシミュレーション結果	2 5
図 2-12	プラズマの透過パワー測定の模式図	2 6
図 2-13	プラズマの分光透過率測定の模式図	2 8
図 2-14	プラズマの分光透過率	2 9
図 2-15	プラズマの分光スペクトル測定の模式図	3 0
図 2-16	プラズマの高速度カメラ画像	3 1
図 2-17	プラズマ発光の分光スペクトル	3 2

図 2-18	1 次試作機外観写真 .....	3 3
図 2-19	1 次試作機外形寸法図 .....	3 4
図 2-20	顧客ニーズと各光源の仕様 .....	3 5
図 2-21	セットアップ A .....	3 5
図 2-22	プラズマ形状 .....	3 6
図 2-23	セットアップ B .....	3 7
図 2-24	エタンデュの測定方法 .....	3 7
図 2-25	各光源の分光放射輝度 .....	3 8
図 2-26	75W キセノンランプの光出力安定性 .....	3 8
図 2-27	レーザー生成プラズマ光源 2 次試作機の光出力安定性 .....	3 9
図 2-28	光出力安定性の測定方法 .....	3 9
図 2-29	ランプの繰り返し点灯性能の評価結果 .....	4 0
図 2-30	相対輝度と相対価格の比較 .....	4 1
図 2-31	相対輝度と相対装置容積の比較 .....	4 1
図 3-1	半導体製造装置と半導体検査装置の世界市場規模の推移 .....	4 6
図 3-2	半導体製造装置に対する半導体検査装置の売上比率の推移 .....	4 7
図 3-3	競争優位性の分類 .....	4 9
図 3-4	各戦略の位置づけ .....	4 9
図 3-5	Ansoff の成長ベクトルの構成要素 .....	5 1
図 3-6	意図的戦略、創発的戦略、実現した戦略の関係 .....	5 2
図 3-7	業界の背有益性を決める 5 つの競争要因 .....	5 3
図 3-8	ポジショニング・ビューとリソース・ベースド・ビューの違い .....	5 5
図 3-9	冰山モデル .....	5 6
図 3-10	経営戦略観の相対位置 .....	5 8
図 3-11	各社の半導体検査装置の売上高の推移 .....	6 0
図 3-12	各社の半導体検査装置の世界シェアの推移 .....	6 0
図 3-13	各社の半導体検査関連の新製品・サービス投入数の推移 .....	6 2
図 3-14	企業合併・買収数の推移 .....	6 3
図 3-15	各社の特許出願数と研究開発費の推移 .....	6 4
図 3-16	従来の半導体製造と検査・解析のサイクル .....	6 8
図 3-17	半導体製造装置と半導体検査装置の連携による改善後のサイクル .....	6 8
図 3-18	A 社の経営戦略の変化 .....	6 9

---

図 3-19	一般的なマトリックスによる SWOT 分析の結果 .....	7 2
図 3-20	X 社の取り得る戦略 .....	7 3
図 3-21	自社製品のみに基づく①の戦略のビジネスモデルキャンバス .....	7 6
図 3-22	競合をパートナーとする②の戦略のビジネスモデルキャンバス .....	7 7
表 1-1	本研究の目的 .....	1 0
表 2-1	レーザー生成プラズマの点灯方式の比較 .....	1 3
表 2-2	実験材料の仕事関数と融点 .....	1 9
表 2-3	実験結果 .....	2 2
表 2-4	SC 光のプラズマの透過率 .....	2 6
表 3-1	戦略の定義 .....	4 8
表 3-2	各社の経営状況.....	6 1
表 3-3	各社のサポート拠点のある国数.....	6 5



# 第1章 序論

## 1.1. はじめに

本章では、本研究の背景、現状と課題、今後の可能性、本研究の目的と構成を示す。

筆者は所属企業である光関連の電子部品・機器メーカーX社において、光源の研究開発に携わっている。その光源ビジネスにおけるビジョンは、新しい光源技術の開発によって人々に新たな価値をもたらし、世界に新たな光産業を生み出すことであり、筆者の現在のミッションは、半導体検査装置市場に対して新しい技術に基づいた従来よりも高輝度長寿命な高輝度紫外可視光源を提供し、半導体検査技術の進歩に貢献することである。最初にこのミッション達成のために行った本研究の背景にある、高輝度紫外可視光源の歴史を振り返る。

## 1.2. 高輝度紫外可視光源の歴史

人工光源の歴史は、イギリスの Davy, H. のカーボンアーク灯（1808年）の実験成功から始まった。カーボンアーク灯は対向するカーボン製の電極間で発生する大気中のアーク放電を利用した光源である。高温のカーボン電極からの黒体放射による赤外域の発光に加えて、発生する高温のアークプラズマからの放射による紫外・可視域の光を利用した光源であり、世界最初の高輝度紫外可視の人工光源でもあった。この光源は、図 1-1 の様な形状で、19世紀から20世紀初頭まで世界中の都市の街路照明として用いられた。

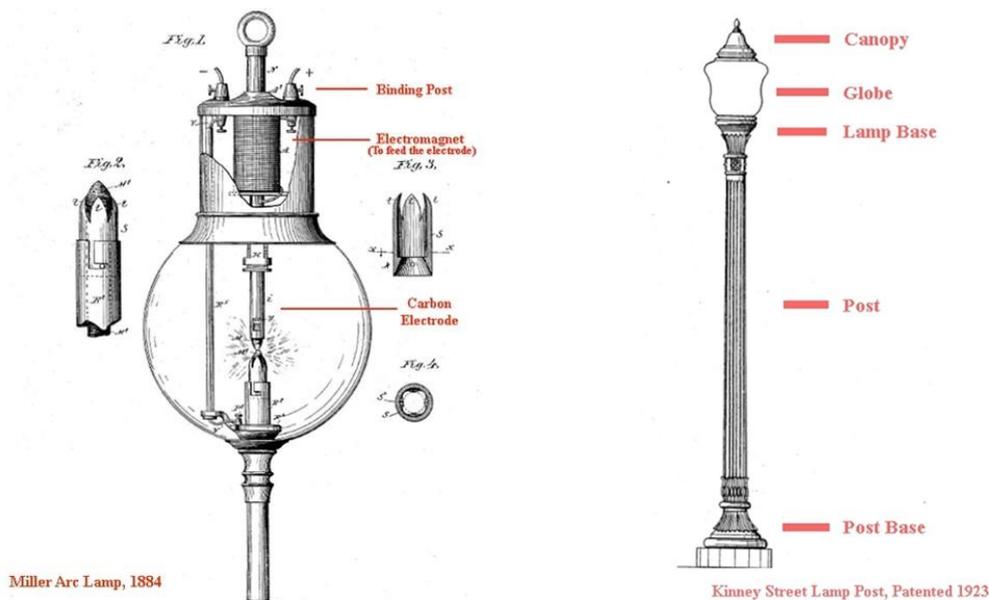


図 1-1 19世紀当時のカーボンアーク灯

出所：<http://www.kbrhorse.net/streetlights/glossary01.html> より引用

街路照明として使用されてきたカーボンアーク灯は、高輝度の点光源であり、演色性も優れていることから、1900年代初頭から映写機の光源として使用され始め、映画館の隆盛に従って生産数を急激に増やしていった。しかし、カーボンアーク灯はカーボン電極を用いて空気中でアーク放電を発生させるため、発光点が移動すること、カーボン電極の寿命が非常に短いこと、煙や音が発生し映写室の環境を汚染していたことや、当時可燃性であった映写フィルムがアーク放電の熱で発火し、火災の原因になるなどの多くの問題を抱えていた。

その様な中、1944年にドイツの Schulz, P.によってキセノンランプが発明され、1950年代には本格的な量産が始まった。キセノンランプは、カーボンアーク灯と同様の高輝度の点光源であり、演色性も優れていた。また、電極材料がカーボンからタングステンやトリエーテッドタングステンに変更されたことにより、発光点の移動が小さくなり、寿命が長くなった。さらに、その電極が石英ガラス製の封体で封じられているため、煙や音・火災などの問題も改善された。そのため、1960年を境に映写機の光源はカーボンアーク灯からキセノンランプに切り替わった。

現在のキセノンランプ（図 1-2、図 1-3）は、対向する2本の電極・石英ガラス製の封体・封体に封入されている高圧のキセノンガス・モリブデン箔やタングステン棒などの石英ガラスとの封止部・金属製の口金やリード線から構成されている放電ランプである。その電極は、タングステンやトリエーテッドタングステン・酸化バリウム含浸タングステンなどが主に採用されている。これらの電極は、高輝度化・発光効率の向上・長寿命化などの市場ニーズに合わせて、仕事関数と動作最適温度・融点などの物性値を指標に改良されてきた。キセノンランプのスペクトルは、図 1-4 の様な太陽光に近い白色光で、色温度は 6,000 K と高く、熔融石英ガラスバルブの場合、185 nm から 2,500 nm の紫外域から赤外域に渡る幅広い連続スペクトルを持つ。その輝度は、連続スペクトルを持つ光源としては非常に高く、高輝度を必要とする様々な用途で用いられてきた。

これらの特長は、点灯時約 40 気圧になる高圧のキセノンガスと、約 6,000 K の高温のプラズマによって得られており、電極の材料や形状・導電部材としての金属箔の処理方法や形状・封体の構造や製造技術など、様々な開発や改良を経て、現在の特性を達成してきた。特に、カソードには様々な材料や製法が用いられ、形状や処理方法などを工夫することで、高輝度化と数千時間にも及ぶ長寿命化が図られており、極めて高いレベルに達した成熟技術となっている<sup>1,2,3</sup>。

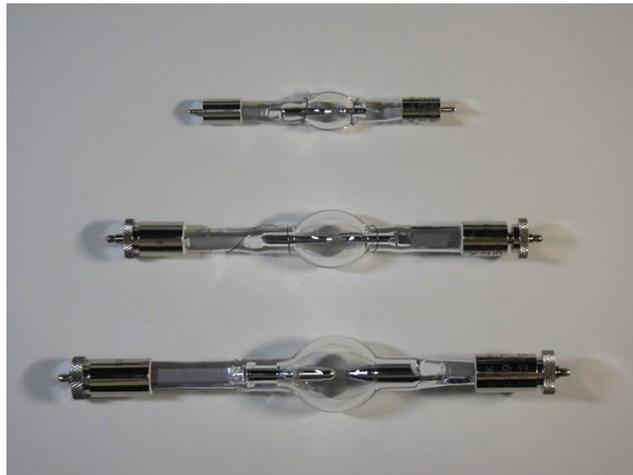


図 1-2 キセノンランプ

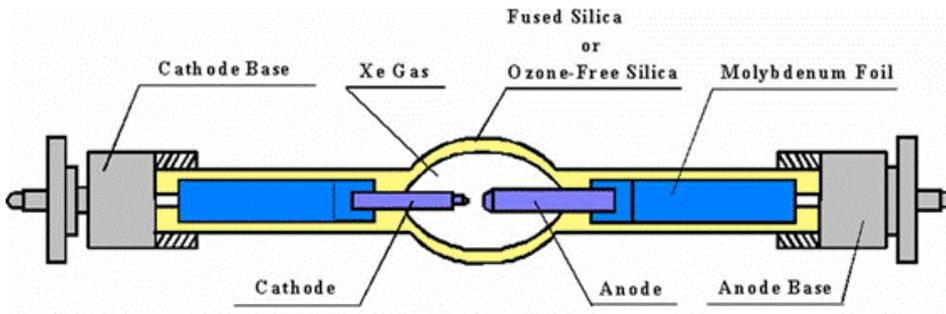


図 1-3 キセノンランプの構造

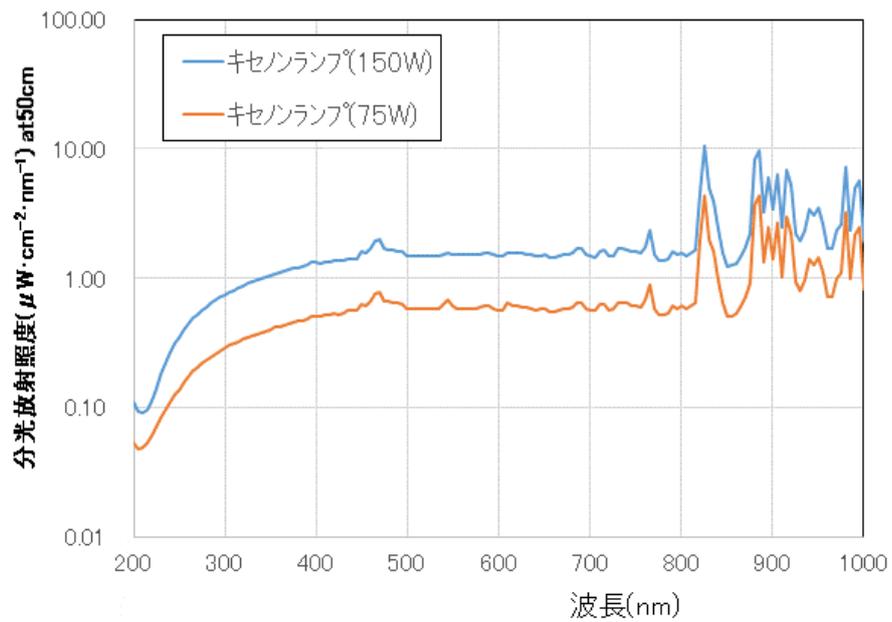


図 1-4 キセノンランプのスペクトル

### 1.3. キセノンランプの用途と課題

キセノンランプは、分光分析装置・顕微鏡・半導体検査装置などの様々な分野で用いられている<sup>4,5</sup>。

分光分析装置のうちキセノンランプが主に用いられるのは、蛍光分光光度計である。蛍光分光光度計は、キセノンランプからの光を測定対象や測定物を溶解した溶液に照射し、その蛍光光を分光測定することで、測定対象の組成や密度を分析する装置である。近年の環境意識の高まりにより、河川・大気・飲用水・食品などの検査や測定に用いられている。蛍光分光光度計の光源には、高い安定性と繰り返し再現性が求められる。

顕微鏡のうちキセノンランプが主に用いられるのは、蛍光顕微鏡である。蛍光顕微鏡の照明として、蛍光観察を行うには水銀ランプの方が適しているが、蛍光の定量測定や生細胞を長期観察する場合はキセノンランプの方が適している。水銀ランプに比べて輝度は低いものの、安定性が高い点や細胞への光ダメージが小さい点から、近年用途が広がっている。

半導体検査装置のうちキセノンランプが主に用いられるのは、半導体ウェハの分光エリプソメトリーによるクリティカルディメンション検査（以下、CD検査）工程である。キセノンランプは、真空紫外域から近赤外域に渡ってほぼフラットな発光スペクトルを有しており、かつ他の光源と比べて高い輝度を持っている。偏光板を通したキセノンランプからの連続スペクトルをウェハに照射すると、反射光は直線偏光から楕円偏光に変化する。この偏光状態の変化を波長ごとに解析することで、膜厚や微細構造を解析するのが分光エリプソメトリーである。この分光エリプソメトリーを用いて、パターン露光後の半導体ウェハの構造や欠陥・異物・パターンエラーなどを検出する工程がCD検査である。

半導体検査において重要な要素は、不具合の検出と不具合要因の解析である。検査工程において、不具合を検出できるだけでなく、その要因まで解析できることによって、稼働率や製造良品率を漸次的に改善することが可能となり、長期的な価格競争力の源泉となる。CD検査では、分光エリプソメトリーによって不具合要因を解析できることから、近年重要度が増している。また、ムーアの法則（図1-5）に基づく半導体パターンの微細化と膜総数や膜厚の増加により、CD検査の光源に求められる輝度は飛躍的に高まり、求められるスペクトル範囲も紫外側・赤外側ともに広がりつつある。

従来から光源には、分光分析装置や半導体検査装置の高分解能化、スループットの向上、及びコストの削減のために、より高輝度・長寿命が求められ続けている。現在もそして今後もより高輝度・長寿命の両方を求める市場に対し、前節で示したようにキセノンランプには技術的な改良の余地がほとんど残されておらず、大きな課題となっている。それは、

カソード材料の仕事関数や耐熱温度などの物性上の課題に加え、現在の長寿命を維持するためには、カソード先端からのプラズマへの供給パワー密度を現在のおよそ  $10^5 \text{ W/cm}^2$  以上にできないこと、プラズマサイズを  $200 \mu\text{m}$  以下にできないこと、石英ガラス製封体の耐圧が現在の構造では限界に達していることなどの工学的な課題が挙げられている。

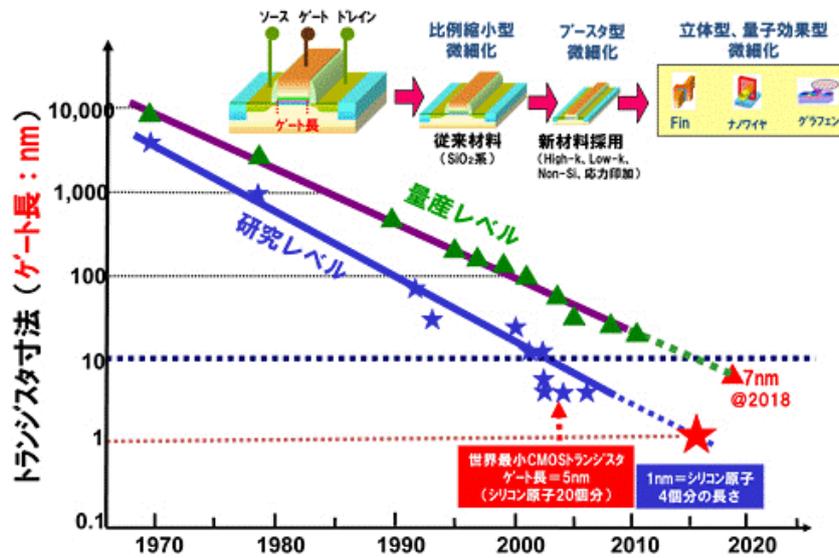


図 1-5 ムアの法則に基づく半導体回路の微細化

出所：Nanotech Japan Bulletin Vol.4, No.6, 2011 発行<sup>6</sup>より引用

#### 1.4. レーザー生成プラズマ光源の可能性と課題

キセノンランプにおける前節で示したような工学的な課題を解決するためには、プラズマへのエネルギー供給を、導電部材としての金属箔や金属棒などを経由しない直接的な方法にし、かつパワーの供給される範囲を小さくすると良い。そのパワー供給方法としては電磁波が有効である。電磁波は電子などの様な質量や電荷を持たないため、プラズマ周波数を超えない限り、電極材料の物性やプラズマ内の物質密度などを考慮せずに、プラズマ空間の微小な領域だけに制限無しに非常に高いパワーを高い効率で集中させることが可能である。

この目的に対し、紫外域から赤外域の電磁波は、 $200 \mu\text{m}$  以下の小さい領域への収束が容易で、かつ遮蔽も簡単であるため、有効である。さらに、高い出力パワーの近赤外域の電磁波を出射可能な半導体レーザーが、目覚ましい小型化と低価格化により、一般的な産業機器に十分搭載可能なサイズと価格となりつつある。以上の現状から、近赤外 CW (Continuous Wave) レーザーをパワー供給源に使った連続発光のレーザー生成プラズマ光源が、現在の市場ニーズに応えるためには最有力であると判断する。レーザー生成プラズマ光源は、1970

年代から学術的に研究されており<sup>7)</sup>、半導体検査装置市場においても近年、競合企業による上市が始まっている。

一方、ミリ波・マイクロ波・高周波などの長い波長の電磁波は、プラズマに直接給電できるものの、波長が長いために 200  $\mu\text{m}$  以下の小さい領域にパワーを高い効率で収束させることが非常に困難であり、高輝度を目的としたプラズマへのエネルギー供給源として適さない。収束可能な X 線などの非常に短い波長の電磁波は遮蔽などの必要性から、装置の小型化が非常に困難である。

次に、レーザー生成プラズマ光源の特長を紹介する。レーザー生成プラズマは、プラズマへの供給パワー密度が高いためにプラズマ温度を上げることが容易であり、その結果、キセノンランプと比べて格段に輝度が高く、真空紫外域から赤外域にほぼフラットなスペクトルを持つ、長寿命な白色の光源として利用できる<sup>7)</sup>。高圧の希ガスや分子ガスなどから発生するレーザー生成プラズマは、そのガス種と圧力におけるアーク放電プラズマと比較すると、輝度は数倍以上高く、スペクトルはプラズマ温度が高いことからピークが紫外側にシフトする。これにより、半導体検査装置市場において求められる紫外域における高出力化の要求にも応えることができる。定常状態のレーザー生成プラズマの模式図を、図 1-6 に示す。プラズマの形状は入射レーザーの集光点かその近傍を先端にした水滴状、もしくは紡錘状や楕円体状であり、集光点の手前側に輝度の最も高い部分を有する。プラズマの直径・長さ・形状は数  $\mu\text{m}$  から数 mm の範囲で、封入されたガス種とガスの封入圧力、入射レーザーのパワーと波長、及び開口数によって決まる。この光源の寿命は、電極を使用しないためにキセノンランプよりも非常に長い。これらの特長は、半導体検査装置市場の高輝度化・長寿命化のニーズに適している。

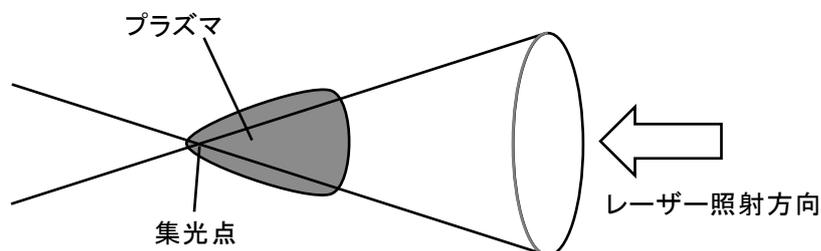


図 1-6 レーザー生成プラズマの模式図

ここで、連続発光のレーザー生成プラズマの基本原理を簡単に紹介する。レーザー生成プラズマは、図 1-7a, b に 2 つの点灯方式のランプ部分の模式図を示した様に、ガスの封入された封体とその外部から供給される集光されたレーザー光から構成される。封体は、レーザー光が透過でき、かつ高温高压の封入ガスを保持できる強度が必要であり、一般にガラスやセラミック・結晶・金属などで作られる。内部には主としてアルゴン、クリプトン、キセノンなどの希ガスや分子ガス、水銀などが、1~200 気圧封入されている。

このランプの点灯方法を図 1-8 a, b に示す。最初に①その封体内のガスを放電やパルスレーザー、点灯用ターゲットなどによりプラズマ化させ、②そのプラズマにガス種・圧力・流量・温度などの条件で決まるパワーとパワー密度以上の CW レーザーを集光照射することによって、入射レーザーの集光点かその近傍を中心としたプラズマにパワーが供給され続け、③CW レーザーのみにより定常的にプラズマが維持される。レーザーには、Nd:YAG などの固体レーザー、CO<sub>2</sub> レーザーなどの気体レーザー、半導体レーザー、ファイバーレーザーなどが使用され、封体の窓材や封入ガス種などに応じて、紫外域から赤外域までの多様な波長のレーザーが利用されている<sup>7)</sup>。

レーザー生成プラズマを利用した半導体検査装置向けの光源製品は近年上市されており、顧客からも注目されている技術である。しかし、これらの製品に使われている技術も発光封体の耐圧限界のために高輝度化が上限に達しつつあり、今後の高いレベルの市場ニーズを十分満たせないことが予想されている。

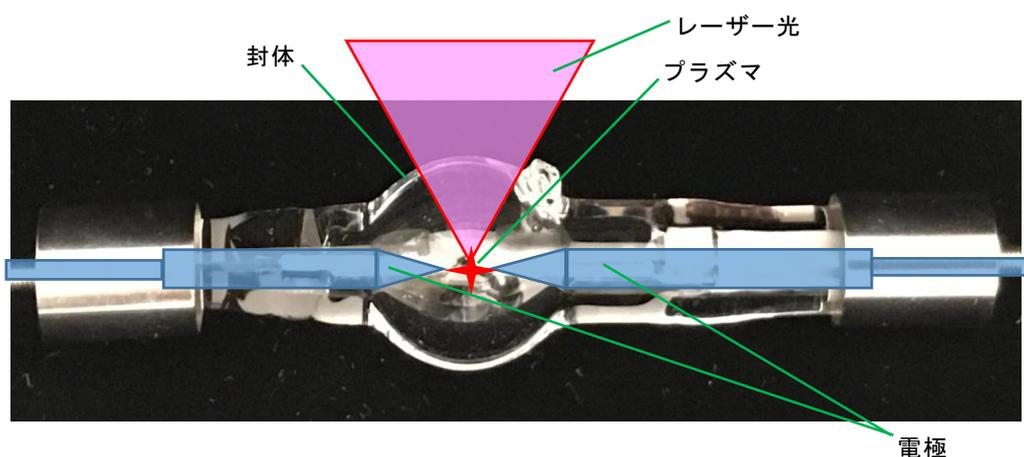


図 1-7a レーザー生成プラズマ光源の模式図（放電方式）

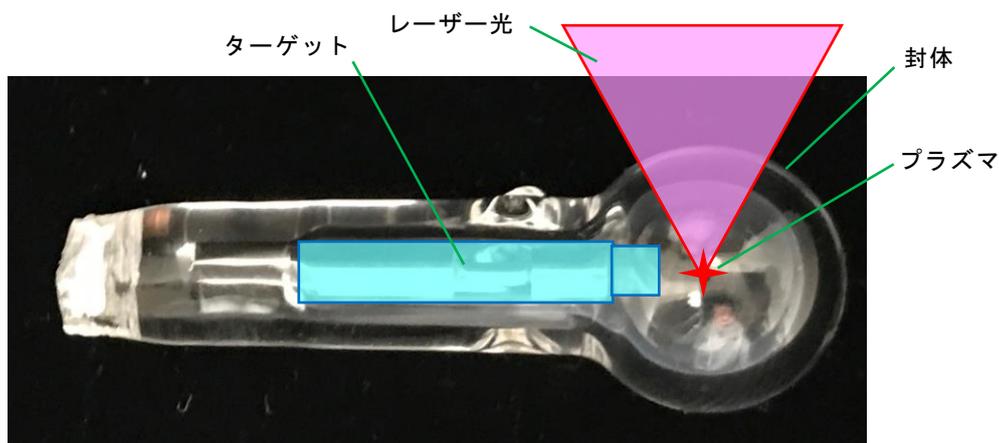


図 1-7b レーザー生成プラズマ光源の模式図（ターゲット方式）

そこで本研究では、上市されているレーザー生成プラズマ光源製品に使用されている放電方式と比較し、発光封体の耐圧が高いために封入ガス圧を高くでき、更なる高輝度化が可能という特長を持つターゲット方式に着目した。一方でターゲット方式は従来、点灯用ターゲットの点灯性と耐久性が十分に検討されておらず、点灯時に kW 級の大型レーザーが必要であり、かつ点灯毎に点灯用ターゲットの交換が必要である、という 2つの課題を持っていた。これらの課題の原因は、①レーザー波長、②ターゲット構造、③ターゲット材料、それぞれの選択にある。

そして、開発した光源の半導体検査装置市場における持続的競争優位性を高めるためには、この市場の動向を調査・分析し、本光源についてリソース・ベースド・ビューとポジショニング・ビューの両方の視点による事業戦略を立案する必要がある。

これらの課題を解決するための、本研究の目的を次節に示す。

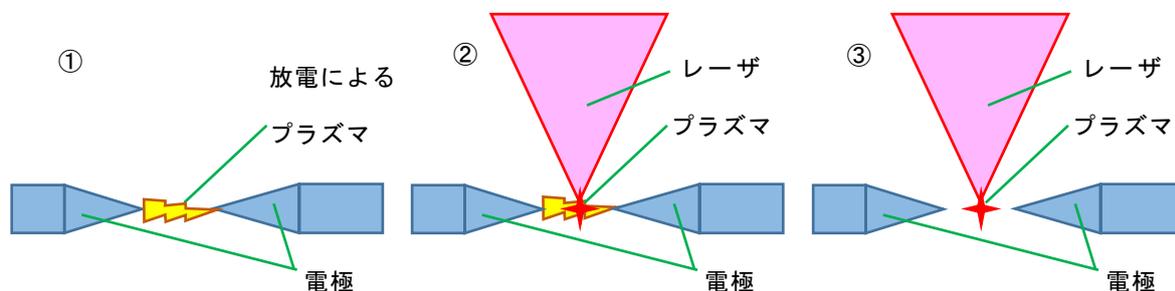


図 1-8a 放電方式レーザー生成プラズマ光源の点灯方法

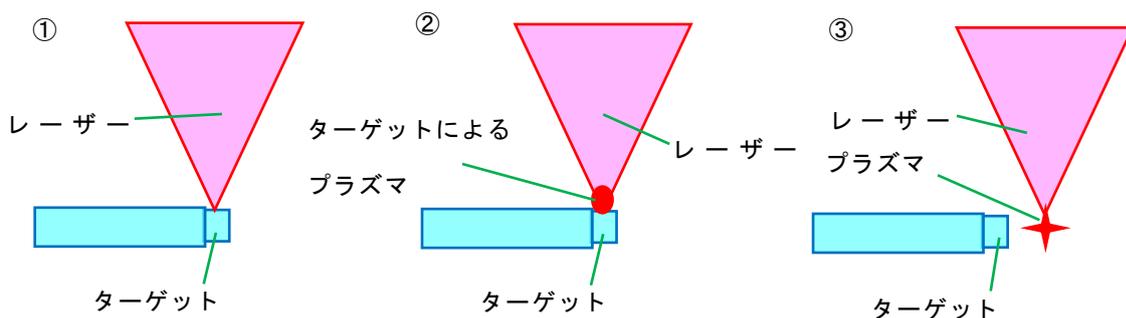


図 1-8b ターゲット方式レーザー生成プラズマ光源の点灯方法

## 1.5. 本研究の目的と構成

ここで本研究の目的と構成を示す。

前述のビジョンとミッションに基づき、前節で示した課題を解決するための本研究の目的は、以下の2つである（表 1-1）。

①ターゲット方式において 100 W 以下のレーザーパワーによる繰り返し点灯の実現、市場要求に応えた半導体検査装置用高輝度紫外可視光源として開発、及び更なる性能向上のための技術的指針の獲得

②開発した光源の半導体検査装置市場における持続的競争優位性を高めるための事業戦略の立案

本研究では、①の目的を達成するために、以下の研究開発を行う。

- ・点灯性の定量評価方法の確立
- ・ターゲット材料の選定
- ・ターゲット構造の改善
- ・点灯プロセスの解明
- ・光源装置の小型化

そして、②の目的を達成するために、以下の研究を行う。

- ・市場分析
- ・半導体検査装置メーカーの戦略分析
- ・開発した光源装置を元にした戦略の立案

表 1-1 本研究の目的

ビジョン	新しい光源技術の開発によって人々に新たな価値をもたらし、世界に新たな産業を生み出す	
ミッション	半導体検査装置市場に、新しい技術に基づいた、従来よりも大幅に高輝度・長寿命な光源を提供し、半導体検査技術の進歩に貢献する	
本研究の目的	ターゲット方式において100W以下のレーザーパワーによる繰り返し点灯の実現、市場要求に応えた半導体検査装置用高輝度紫外可視光源として開発、及び更なる性能向上のための技術的指針の獲得	開発した光源の半導体検査装置市場における持続的競争優位性を高めるための事業戦略の立案
手段	<ul style="list-style-type: none"> <li>・点灯性の定量評価方法の確立</li> <li>・ターゲット材料の選定</li> <li>・ターゲット構造の改善</li> <li>・点灯プロセスの解明</li> <li>・装置の小型化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・市場分析</li> <li>・半導体検査装置メーカーの戦略分析</li> <li>・開発した光源を元にした戦略の立案</li> </ul>
結論	半導体検査装置の市場要求に応えた、高輝度紫外可視光源装置として開発	市場動向とプレイヤーの戦略を分析し、本光源の事業戦略を立案

次に、本論文の構成を示す。本論文は以下の4章から構成される。その構成を図1-9に示す。

第1章では、序論として本研究の背景として高輝度紫外可視光源の歴史からキセノンランプの現状の課題を俯瞰し、レーザー生成プラズマ光源の課題と本論文における目的と構成を示す。

第2章では、レーザー生成プラズマ光源の技術的課題の解決と光源装置の開発について述べる。まず、レーザー生成プラズマ光源の技術的課題の解決として、ターゲット方式レーザー生成プラズマ光源の点灯性の定量評価方法の確立・ターゲット材料の選定・ターゲット構造の改善・点灯プロセスの解明を行った。その点灯性を向上させた結果と、開発した光源装置の仕様について述べる。第2章のうち、ターゲット方式レーザー生成プラズマ光源の点灯性の定量評価方法の確立・ターゲット材料の選定・ターゲット構造の改善・点灯プロセスの解明については、照明学会誌に査読付き論文として投稿した内容である。

第3章では、戦略に関する先行研究を調査し、ターゲット市場である半導体検査装置市場の動向と、プレイヤーの経営戦略を分析する。その上で、開発したレーザー生成プラズマ光源の戦略を立案する。立案した戦略の一部が、本光源事業に関連して実際に実行されたため、その進展が立案した戦略と一致しているか確認する。第3章のうち、半導体検査装置市場の動向とプレイヤーの経営戦略の分析の一部は、経営情報学会において発表した内容である。

構成上、本論文においては本光源の技術開発と市場動向の分析から戦略立案を別の章として分けて記述しているが、実践の中においては常に相互関係にあった。例えば、本光源を開発する前段階において市場要求を調査しつつ市場動向を分析し、それらを受けて光源装置の目標仕様を決めて開発を進めた。

最後に第4章では、本研究を総括した結論と、今後の課題と展望について述べる。

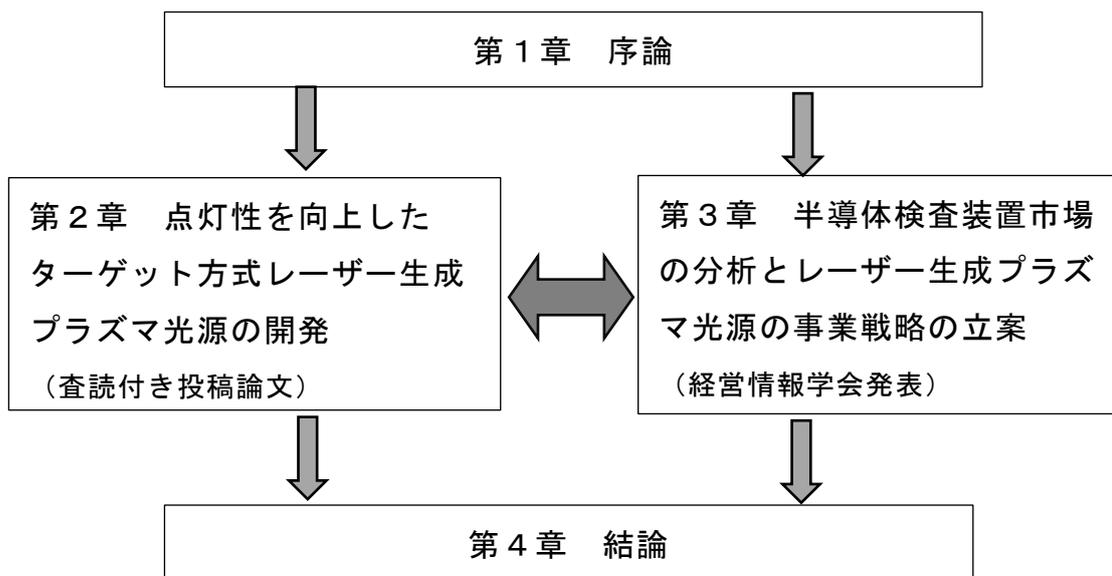


図 1-9 本論文の構成

## 第1章 参考文献・引用

1. 佐藤恭一・木村親夫（1992）「大電流熱電子源」応用物理, 第61巻, 第7号.
2. 電気学会放電ハンドブック出版委員会編（1998）『放電ハンドブック』電気学会.
3. 金田輝男（2003）『気体エレクトロニクス』コロナ社.
4. 西村節志・佐藤辰巳（1993）「分光技術第3講可視紫外分光技術」分光研究, Vol.42, p.253.
5. 原信義・杉本克久（1997）「分光エリプソメトリーによる表面薄膜解析」まてりあ, Vol.36, p.337.
6. Nanotech Japan Bulletin Vol.4, No.6, 2011.
7. Radziemski, L. J., & Cremers, D. A. (1989). *Laser-induced plasmas and applications*, Marcel Dekker.

## 第2章 点灯性を向上したターゲット方式レーザー生成プラズマ光源の開発

### 2.1. はじめに

本章では、ターゲット方式レーザー生成プラズマ光源の技術的課題に対する研究開発の方法と結果とその成果として開発した光源装置で得られた特性と仕様について述べ、更なる性能向上のための技術的指針を獲得するために点灯メカニズムを検討し、開発した光源装置が目標とする市場ニーズの仕様を満たしているかどうか、本研究で研究開発した技術が市場全体をカバーし得るかについて確認する。

### 2.2. 背景と課題

#### 2.2.1. 点灯方式

レーザー生成プラズマの特性を決める上で非常に重要となるプラズマの初期生成方式（以下、点灯方式）について概説する。ガスの封入された封体に集光照射される CW レーザーは、プラズマには高い割合で吸収されるものの、レーザーのパワーを吸収し得る電子や励起状態の原子・分子が存在しない中性の原子や分子にはほとんど吸収されない。そのため、レーザー生成プラズマを実用的な光源装置とする場合、封入ガスの一部を何らかの方法で最初にプラズマ化して、プラズマ維持が可能なパワーを入射される CW レーザーから吸収できるレベルにする必要がある。この最初のプラズマが発生した状態を、本研究では「点灯」と定義する。

表 2-1 レーザー生成プラズマの点灯方式の比較

点灯方式		耐圧	コスト	寿命	小型	点灯性
放電方式	アーク放電	△	△	◎	○	◎
	火花放電	△	○	◎	◎	◎
パルスレーザー方式		○	×	◎	×	○
高周波方式		○	○	◎	○	×
ターゲット方式		○	○	◎	△	△

点灯方式は、封体内部の電極からのアーク放電や火花放電を用いて点灯する方法（以下、放電方式）<sup>1</sup>、パルスレーザーを用いて点灯する方法（以下、パルスレーザー方式）<sup>1</sup>、マイ

クロ波などの高周波を用いて点灯する方法（以下、高周波方式）<sup>1</sup>と、固体ターゲットを用いることによって、入射レーザーで直接点灯させる方法（以下、ターゲット方式）<sup>3</sup>の4つに大別される。これらのプラズマの点灯方式の特徴を、表 2-1 にまとめる。

一般的には、構造の単純さや導入コストが低いことから放電方式が主に用いられてきた（図 2-1）。放電方式はさらにアーク放電方式と火花放電方式に分かれるが、これら2つの仕様に大きな差は無い。この点灯方式は X 社の競合企業である光源メーカーの Y 社が採用し、かつ強力な基本特許を保有している方式であり、点灯に必要な装置が小型安価で点灯の繰り返し性能も非常に高いという特長を持つ。しかし、この方法は電極を外部と電気的に接続する必要があるため、封体と金属の接合部である封止部の強度が弱く、それが封体の耐圧を低下させる原因となってきた。図 2-2 に示す様に、レーザー出力が一定の場合、封入ガス圧が上がると輝度は高くなる。つまり、封体の耐圧が低いと高いガス圧を封入できず、同じレーザーパワーで比較した場合、発光輝度が他の方式に比べて低い。

パルスレーザー方式は、パルスレーザーでプラズマを点火し、そこに CW レーザーを入射してプラズマを維持する方式である。この方式は、封体の耐圧を高くすることができるという特長を持つが、高価なパルスレーザーが必要なため、コストが高く、装置が大型になるという課題がある。

高周波方式は外部との電気的な接続は不要なため、封体の耐圧は上げられるという特長を持つ一方、点灯時の封入ガス圧が高いと点灯できないため、結果として低い発光輝度しか得られないという課題がある。

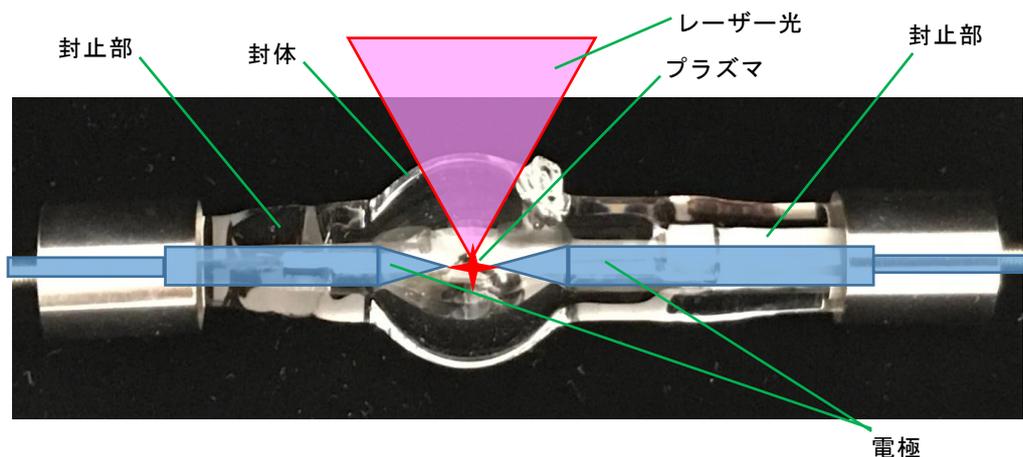


図 2-1 放電方式の模式図（ランプ部）

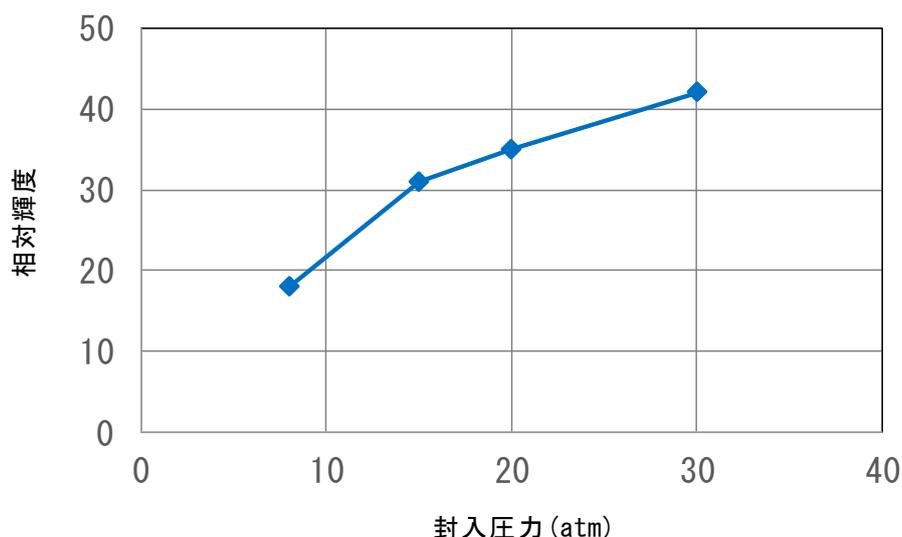


図 2-2 封入ガス圧と相対輝度

### 2.2.2. ターゲット方式の先行研究と課題

これらの方式に対し、ターゲット方式は内部の点灯用ターゲットを外部と電氣的に接続する必要がないため封止部が存在しない。そのため、封体の耐圧と封入ガス圧を上げることが可能となり、高輝度化が容易である点で優れている。一方でターゲット方式はこれまで、点灯用ターゲットの点灯性と耐久性が十分に検討されておらず、点灯時に kW 級の大型レーザーが必要であり、かつ点灯毎に点灯用ターゲットの交換が必要である、という2つの課題を持っていた。これらの課題の原因は、①レーザー波長が長いためにターゲット材の吸収率が低いこと、②ターゲット構造が細いワイヤー状のため点灯時に蒸気化により消失すること、③ターゲット材料の点灯性が低いことにある。

そのため、ターゲット方式は実験的な実施例のみ<sup>3</sup>で実用化はされてこなかった。この実施例のランプ部分の構造を図 2-3 に示す。耐圧が 1,000 気圧の金属製の筐体内に楕円ミラーを設置し、2kW の CO<sub>2</sub> レーザー光を ZnSe 窓から入射し、細いタングステン製ワイヤーの点灯用ターゲットを磁力で動かすことでレーザー光の集光点を通過させて点灯し、レーザー集光点で生成されているプラズマからの発光をサファイア窓から取り出すという構造と点灯の仕組みのものである。ワイヤーターゲットは、点灯時に蒸気化により消失するため、点灯毎の交換が必要である。

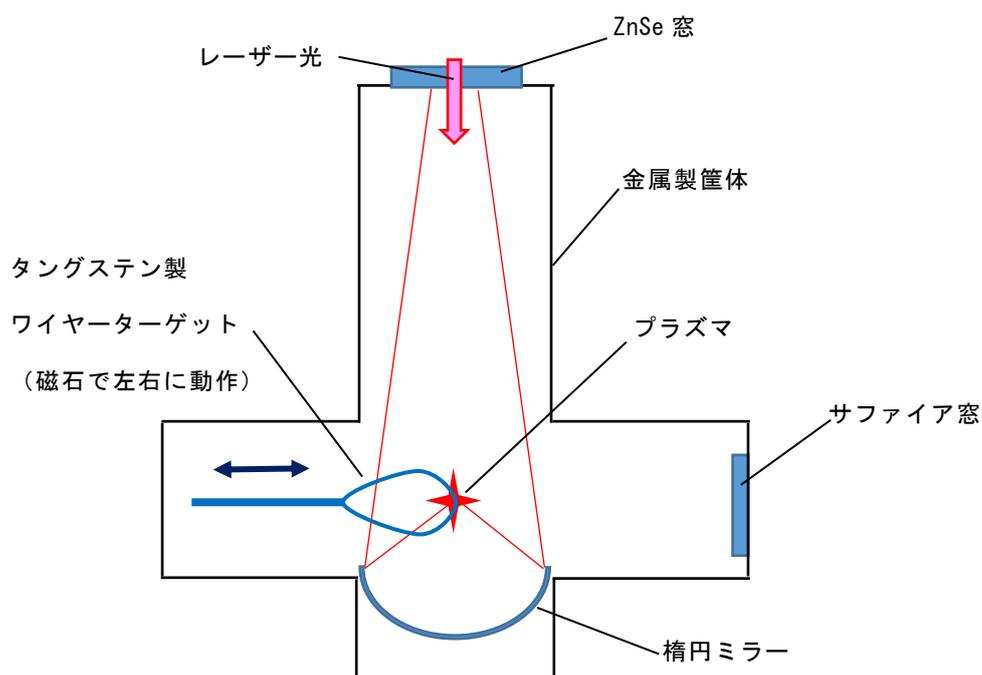


図 2-3 先行研究の実施例（ターゲット方式のランプ部模式図）

出所： Carlhoff, C. et al., (1981). Continuous optical discharges at very high pressure, *Physica*, 103C, p.439.<sup>6</sup> Fig.1 を筆者が一部修正し引用

### 2.2.3. 課題解決の方法

前節で述べた課題を解決して、ターゲット方式において 100 W 以下のレーザーパワーによる繰り返し点灯の実現、市場要求に応えた半導体検査装置用高輝度紫外可視光源の開発、及び更なる点灯性向上のための技術的指針の獲得するために、下記の順に実験と考察を行う。

- i) 100 W 以下の低いレーザーパワーで点灯可能で、かつ複数回の点灯が可能なターゲット形状と材料の検討
- ii) 各材料の点灯性の定量的な評価
- iii) 評価結果に基づいた点灯メカニズムの検討
- iv) 装置の小型化
- v) 開発した光源装置の特性評価

以上に対し、本章では 3 節で i)ターゲット形状と材料について検討し、4 節で ii)点灯性の定量化の方法と評価について報告し、5 節で iii)点灯メカニズムについて検討して点灯条件を考察し、6 節で iv)小型化の結果について報告し、7 節で v)開発した光源装置の特性評価結果を報告し、8 節で従来光源と仕様を比較し、9 節でこれらをまとめる。

### 2.3. レーザー波長の変更とターゲットの形状の考案

レーザーを何らかの固体もしくは液体の物質に照射して周囲の気体をプラズマ化させるという技術に関しては、様々な物質について研究が行われてきた。例えば、自動車用エンジンの点火<sup>4</sup>や、ロケット用推進剤の点火<sup>5</sup>、などである。これらの研究において、ターゲットの形状・素材・レーザーパワーに応じて、プラズマの点灯性やターゲットの耐久性が異なることが明らかになっている。

レーザー生成プラズマにおいては過去、高融点の細い純タングステン製のワイヤーを外部から動かし、レーザーの集光点を通過させることで、プラズマを発生させた例がある<sup>3</sup>。この点灯方式は、実験を目的として用いられた事例はあるが、これまで点灯用ターゲットの点灯性と耐久性が十分に検討されておらず、点灯時に kW 級の大型レーザーが必要であり、かつ点灯毎に点灯用ターゲットの交換が必要である、という2つの課題を持っていたため、これまで実用化に至らなかった。

これらの課題の原因は、ターゲット材料のレーザー光吸収率が低い点、ターゲットが細いワイヤー状であるために点灯時の熱により形状を維持できない点、及びターゲット素材がタングステンであるために仕事関数が高くプラズマの点灯性が低い点にあると推測した。ここから、レーザー波長の 10.3 $\mu\text{m}$  から 1 $\mu\text{m}$  帯への短波長化によるターゲット材料のレーザー光吸収率の向上、ターゲット形状の改善による耐久性の向上、及び適切な融点と仕事関数の材料の採用により、これらの課題を解決できるのではないかという仮説を立てた。この仮説に基づき、レーザー波長を 1 $\mu\text{m}$  帯へ短波長化し、新しいターゲット形状を考案した。考案したターゲット形状の模式図を、図 2-4 に示す。ターゲットは、円柱形や錐形・直方体・斜円柱・切頭円柱などワイヤー状ではない形状で作製し、リード部分にレーザー加熱の効率化のためにヒートダム構造を設けている。

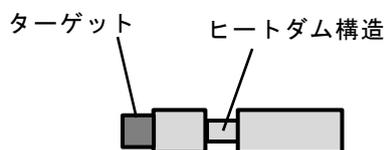


図 2-4 ターゲット形状

このターゲットを、高圧の希ガスを封入した石英ガラスバルブ内部に設置したものが本光源のランプである。その模式図と写真を図 2-5 に示す。ターゲット材料については、次節で詳細に説明する。

次に、このターゲット形状に合わせた点灯方法について図 2-6 に示す。①入射レーザーを集光レンズでターゲット表面に集光照射すると、②入射レーザーの集光点近傍にプラズマが発生する。プラズマが発生した直後、③レーザーの集光点をターゲットから離してランプバルブ中心に移動させると、発生したプラズマはその状態を維持したまま集光点と一緒に移動する。その後、レーザーを入射し続けている間、プラズマはランプ中に維持される。この新しい点灯方式を採用により、従来からの課題であったターゲットの長寿命化と、点灯に必要なレーザーパワーの低減が可能になり、実用的な光源にできると推測した。

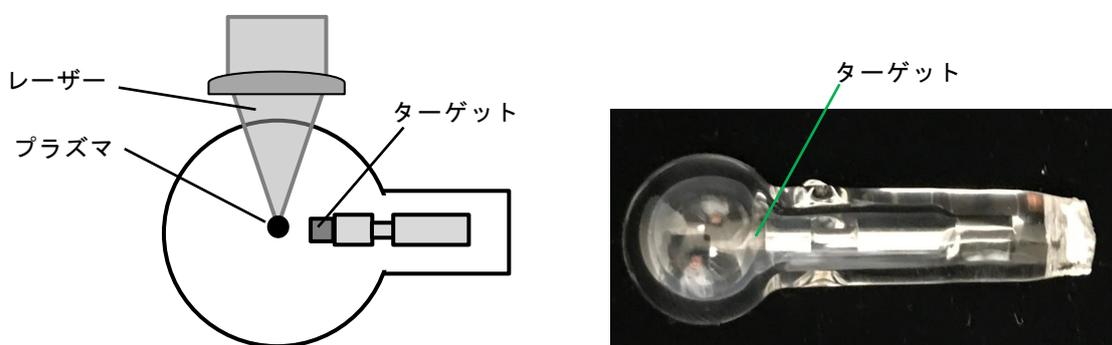


図 2-5 点灯方式の模式図と実物写真

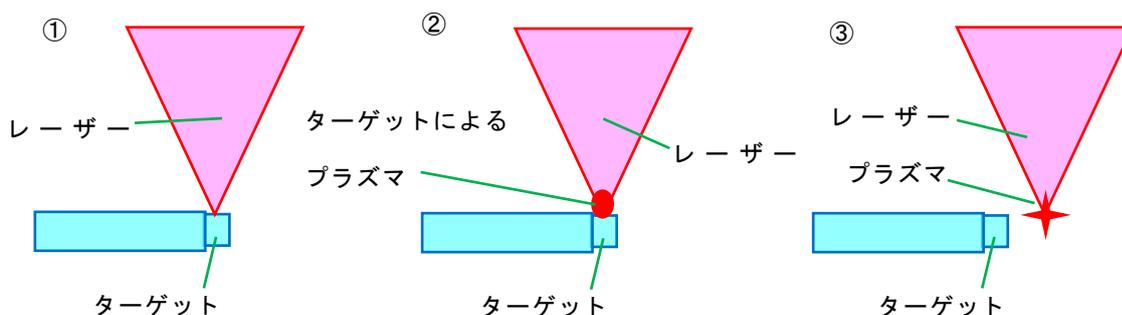


図 2-6 ターゲット方式レーザー生成プラズマ光源の点灯方法

## 2.4. ターゲット材料の点灯性評価

### 2.4.1. 仕事関数と融点に着目した材料の検討

今回の実験では、ターゲット材料は、融点と仕事関数に着目し、これらをパラメーターとして選定した。これらの物性値に着目した理由は、融点はレーザーアブレーションに対する耐久性の上で重要と推測したため、仕事関数は気体のプラズマ化に電子の寄与が期待

できることから重要と推測したためである。

その結果、過去に使用されていたタングステン、タングステンと比べて融点が比較的 low 仕事関数が同等の白金、融点が同等で仕事関数が比較的 low トリエーテッドタングステン ( $\text{ThO}_2$ :2% 以下、トリタン)、融点は低いものの仕事関数もきわめて低いバリウム酸化物を含浸させたポーラス状のタングステン (以下、バリウム含浸タングステン) の4種類を選定した。これらの材料の融点や仕事関数を表 2-2 に示す。

表 2-2 実験材料の仕事関数と融点<sup>7,8</sup>

材質	仕事関数(eV)	融点(K)
タングステン	4.54	3,653
白金	5.1	2,023
トリエーテッド タングステン	2.55	3,323
バリウム含浸 タングステン	1.7	2,196

#### 2.4.2. 点灯性評価方法の考案

本研究では、「点灯性」を点灯に必要な最小のレーザーパワーで表し、数値が小さいほど点灯性が良いと規定する。各材料に対する点灯性を定量的に評価するために、実験方法を考案した。その実験系を図 2-7 に示す。常温時 20 気圧のキセノンガスを封入した石英ガラス製バルブの内部に、各材料同じ形状のターゲットを設置する。それに、集光レンズから出射される出力パワーを 20~100 W の範囲で調整可能な波長 980 nm の LIMO 社製レーザーダイオード (以下、LD) からの出射光をバルブ内のターゲットに集光 ( $f=50$  mm のコリメートレンズで  $\phi 23$  mm の平行光にし、 $f=25$  mm/開口数=0.417 で集光)照射して加熱を開始する。ターゲットの加熱が進み、ある瞬間に集光照射部付近が急激に明るくなり高輝度光源が形成され、プラズマが点灯する。これがキセノンガスのレーザー生成プラズマである。この加熱からプラズマが点灯するまでに要した時間をそれぞれ計測した。レーザーの照射時間は、最大 60 秒までとした。レーザー光の集光径は  $\phi 55$   $\mu\text{m}$  で、LD 出力を調整することで集光点のターゲット面上における照射パワー密度を  $7.8 \times 10^5 \sim 3.9 \times 10^6$   $\text{W}/\text{cm}^2$  の範囲で調整可能である。レーザーの波長については、キセノン原子の吸収線に合致させるため、LD の温度調整による微調整機能を利用して、本実験では  $980 \pm 0.2$  nm 以内に制御して使用した。

ターゲット材料は、タングステン、白金、トリタン、バリウム含浸タングステンの4種類で、すべてφ 2 mm/長さ 2 mm の円柱状に成形し、ターゲットの加熱時間を短くするためのヒートダム構造(図 2-7b ターゲット部拡大図参照)を持ったφ 2.5 mm のモリブデン棒の先端に固定した。実験では、レーザーの集光点を常に固定し、試験ごとに直交2方向からのカメラでターゲットを正確に同じ位置に設置して実験を行った。この設置位置のズレはカメラ分解能の±5 μm 以内である。この集光点の位置のズレから推測される集光パワー密度の割合は、ズレが無い状態を 100%として、ズレが最大の場合でも 92%と十分高い再現性が確保できている。

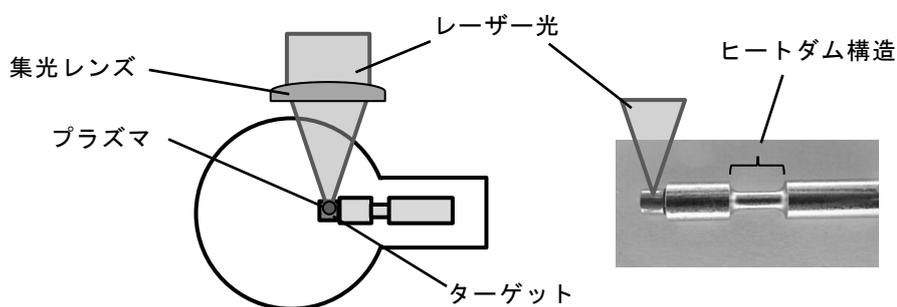


図 2-7a 点灯性実験の模式図

図 2-7b ターゲット部拡大図

### 2.4.3. 点灯性評価の結果と考察

実験の結果を図 2-8 に示す。横軸にレーザーの出力パワーを、縦軸に点灯までの時間を示す。タングステン製のターゲットは、最大出力の 100 W でも点灯しなかった。過去の実施例において、細いワイヤーで 2 kW の CO<sub>2</sub> レーザーを入射した場合は点灯できたものの、ワイヤー状のものと比較して大きいターゲットの体積と、100 W と低い入射レーザーパワーでは点灯に必要な条件に到達しなかったものと推測する。実験後のターゲットの表面状態を顕微鏡で観察したところ、レーザー照射前後での変化はまったく見られなかった。この点からも、この材料と形状に対しては、入射パワー密度が不足していたと考えられる。白金製のターゲットも、同様に最大出力の 100 W でも点灯しなかった。実験後のターゲットの表面状態を顕微鏡で観察したところ、レーザー集光点表面が熔融していることが観察された。

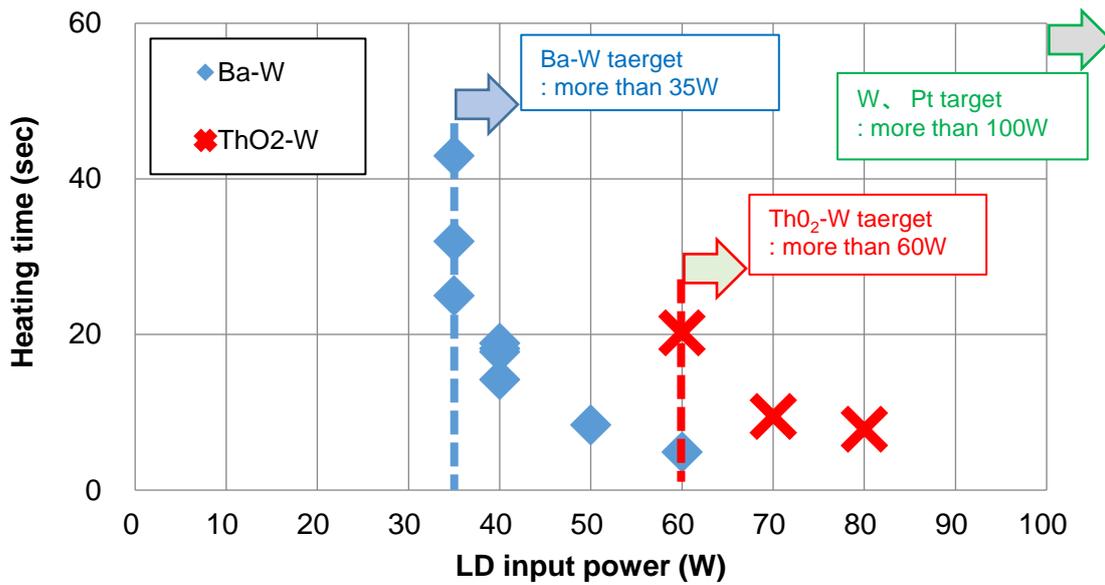


図 2-8 入力パワーごとの点灯開始時間

トリタン製のターゲットは、55 W 以下では点灯しなかったが、60 W 以上では点灯し、点灯までの時間は入射レーザーのパワーに対して短くなった。実験後のターゲットの表面状態を顕微鏡で観察したところ、レーザー集光点表面が熔融していることが観察された。点灯時のターゲット上のレーザー集光点温度は、保有しているサーモカメラの上限温度の約 1,200 K を超えていたため、実測できなかった。

バリウム含浸タングステン製のターゲットは、30 W 以下では点灯しなかったが、35 W 以上では点灯し、点灯までの時間はレーザーのパワーに対して短くなった。点灯時のターゲット上のレーザー集光点温度は、保有しているサーモカメラの上限温度の約 1,200 K を超えていたため、実測できなかった。

点灯回数については、トリタン製のターゲットでは再点灯ができなかったが、バリウム含浸タングステン製のターゲットにおいて同じターゲットの同じ場所で複数回数の繰り返し点灯ができることを確認した。しかし、繰り返し点灯することで徐々に表面状態が変化し、点灯までの加熱時間が長くなり、繰り返し8回目より後は点灯できなくなった。実験後のターゲットの表面状態を顕微鏡で観察したところ、レーザー集光点が熔融し、その周辺に内部から酸化バリウムと考えられる物質が析出していた。これらの結果を表 2-3 にまとめる。

表 2-3 実験結果

材質	結果	点灯最小 パワー	表面状態	再点灯性
タングステン	不点灯	100 W 以上	変化無し	×
白金	不点灯	100 W 以上	溶融	×
トリタン	点灯	60 W	溶融	×
バリウム含浸 タングステン	点灯	35 W	溶融 Ba 噴出し	○ (8回)

この実験において、すべて同じ条件で4種類のターゲットを加熱し、その点灯までの時間を測定することで、新たに点灯条件を定量化した。その結果、バリウム含浸タングステンの点灯性が最も優れており、複数回の再点灯が可能であることを実証した。次いでトリタンが点灯は可能であったが再点灯はできないこと、タングステンと白金は今回のパワーでは点灯できないことを明らかにした。融点が低く仕事関数も低いバリウム含浸タングステンと融点が高く仕事関数は低いトリタンの2種のみ点灯し、融点が高く仕事関数も高いタングステンと融点が低く仕事関数は高い白金は点灯しなかった。これらの結果は、点灯性においてターゲット材料の融点よりもその仕事関数の方が重要な要素であることを示唆している。

## 2.5. 点灯メカニズムの検討

### 2.5.1. 点灯プロセスにおけるエネルギーの流れ

今回の4つの物質の中で最も点灯性の高かったバリウム含浸タングステンについて、レーザーから供給されるエネルギーの流れに着目して点灯メカニズムを検討する。点灯にはレーザー集光点付近のキセノンガスに必要なエネルギーを供給することが必要である。そのプロセスには、図 2-9 に示す様に①レーザーのエネルギーを吸収したターゲット表面からの加熱、かつまたは、②レーザーからの直接加熱によるレーザー集光点付近のキセノンガス領域の物質のエネルギー供給の2つが考えられる。そこで 2.5.2 項では点灯時のターゲット表面温度の観点から、ターゲット表面からの加熱によるキセノンガスのプラズマ化の可能性について検討する。2.5.3 項ではキセノンガス領域に存在する電子・キセノン原子(中性・励起状態)・キセノンイオン、ターゲット中のタングステン原子と酸化バリウム(分子・微粒子)のレーザーエネルギー吸収によるキセノンガスのプラズマ化の可能性について検討する。

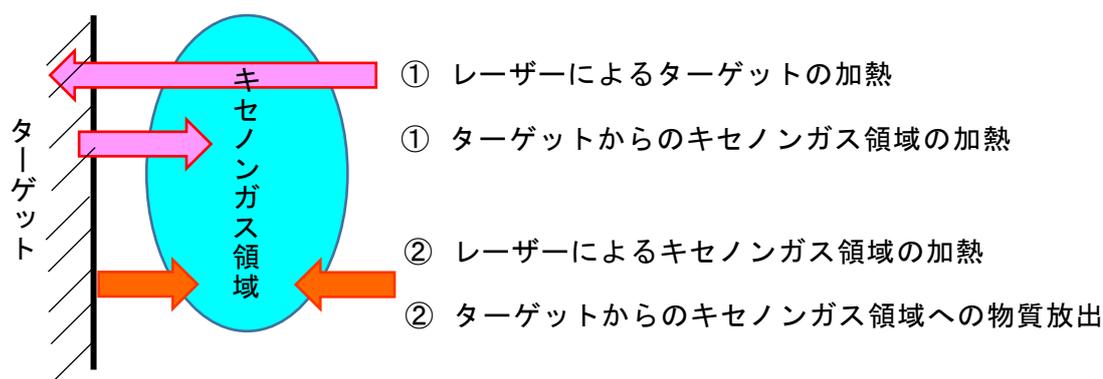


図 2-9 点灯時のエネルギーの流れ

### 2.5.2. ターゲット表面からの加熱による点灯の可能性

ターゲット表面からの加熱によりキセノンガスがプラズマ化すると仮定するならば、入力されるレーザーパワーが変わっても一定のターゲット表面温度で点灯すると考えられる。それを検証するためには、点灯直前のバリウム含浸タングステン製のターゲット上のレーザー集光点温度を実測することが最適であるが、これは保有しているサーモカメラでは実測できなかった。そこで、ターゲットをレーザーで加熱した際のレーザー集光点部分の温度上昇を熱流体解析によりシミュレーションし、レーザー集光点の点灯時の温度を算出することとした。計算には、SOLIDWORKS 2016 (Dassault Systèmes SolidWorks Corporation)の熱シミュレーションモジュールを用いた。

熱流体解析における基礎方程式は、質量保存則としての連続の式、運動方程式としての時間依存のナビエ-ストークス方程式、及びエネルギー保存則の三つの微分方程式である。シミュレーション方法は、矩形（平行 6 面体）の計算メッシュに対し、有限体積法 (FVM) で行った。計算に必要なそれぞれの部材の熱伝導率・放射率・吸収係数・透過率・密度・比熱・屈折率・気体の粘度の定数は、主に SolidWorks Flow Simulation HVAC Module の材料データベースと産業技術総合研究所の分散型熱物性データベースのデータを採用し、不足している部分は文献値<sup>8</sup>を採用した。

入射レーザー波長に対するバリウム含浸タングステン製のターゲットの吸収率は、以下の方法で求めた。まず、Taylor の第 3 法に基づく積分球を用いた絶対反射率測定法<sup>9</sup>によって絶対反射率を測定した。バリウム含浸タングステンは透過率が 0 であるため、吸収率 = 1 - 全反射率によって入射レーザー波長の分光吸収率を 0.592 と求めた。バリウム含浸タングステンの放射率はポーラスタングステンの放射率と同じと仮定した。

シミュレーションの収束条件をあらかじめ求めた後、メッシュサイズを最大 1 mm、レー

レーザー光の集光点付近はレーザーの集光径  $\phi$  55  $\mu\text{m}$  を考慮して 0.01 mm とし、メッシュ構造を決定した。シミュレーション結果と実測のずれを確認するために、ターゲットを支持しているモリブデン製リード部分の温度のサーモカメラによる実測値とシミュレーション結果を確認し、その比が $\pm 10\%$ 以内に入っていることを確認した。この結果から、ターゲット上のレーザー集光点の温度についても、シミュレーション結果の実際の温度に対する誤差は十分小さいと推測する。

シミュレーションの結果を図 2-10 に、シミュレーション結果を実線で、点灯までの時間を破線で示す。シミュレーションの結果、点灯時のターゲット表面のレーザー集光点温度は、60 W 入力時 3,879 K に対し、50 W 入力時 3,454 K、40 W 入力時 3,015 K、35 W 入力時 2,765 K と大きく異なり、入射レーザーパワーが小さくなると温度も低くなった。ここから入力レーザーパワーと点灯時の温度の関係を明らかにするために、入射レーザーパワーと点灯時のターゲット表面のレーザー集光点温度だけを図 2-11 に示す。

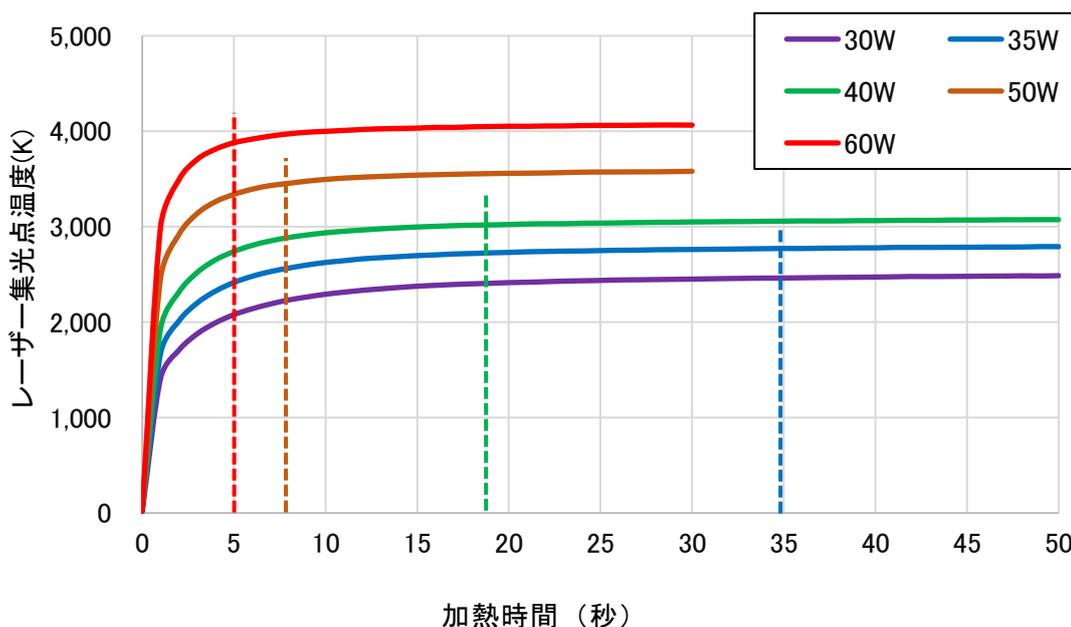


図 2-10 入力パワー毎のレーザー集光点温度推移のシミュレーション結果

このグラフから、入力レーザーパワーと点灯時のレーザー集光点温度には正の相関があり、一定の温度では点灯していないことが明らかになった。このグラフを線形近似すると、 $Y=44.3x+1229.3$  と表され、その相関係数は  $R^2=0.9992$  である。この線形近似式から点灯しなかったレーザー入力 30 W 時のレーザー集光点温度を計算すると、2,558 K となる。熱シミュレーションの結果では、レーザー入力 30 W 時の加熱 60 秒後のレーザー集光点温度は

2,494 K であり、算出された点灯温度には達していない。

これらの結果から、二つのことが明らかになった。一つは、入力レーザーパワーと点灯時のレーザー集光点温度には相関があり、30 W 以下で点灯しなかった事実とも一致した結果から、点灯時のレーザー集光点温度が点灯の重要な要素であることである。もう一つは、点灯時のレーザー集光点温度は入力レーザーパワー毎で一定ではなかった結果から、ターゲット表面からの加熱のみによりキセノンガスがプラズマ化するという仮説は否定され、加熱源だけで点灯のメカニズムを説明することはできないことである。

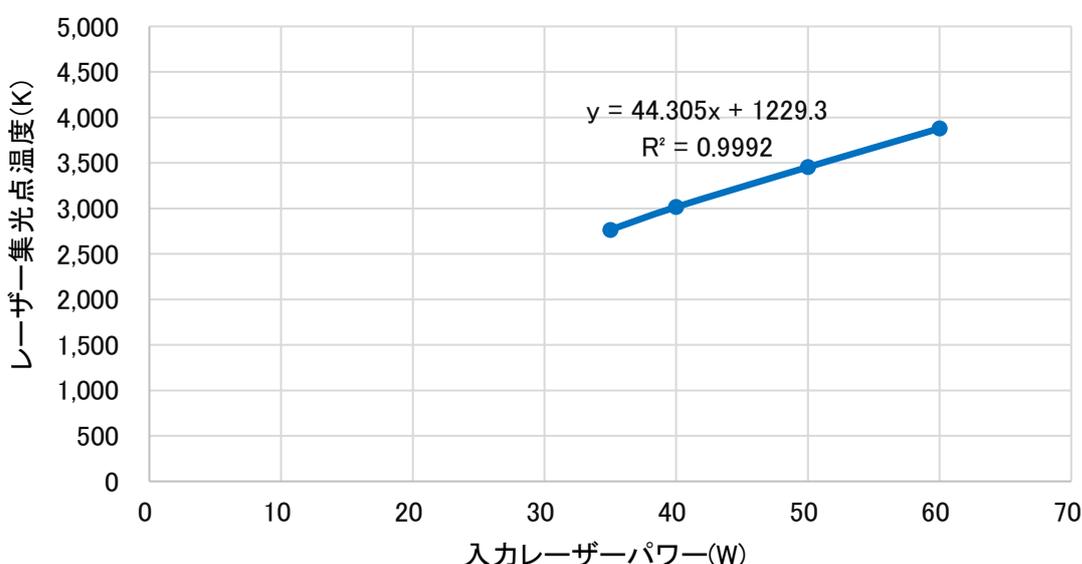


図 2-11 入力パワー毎の点灯時レーザー集光点温度のシミュレーション結果

### 2.5.3. ガス領域のレーザー吸収による点灯の可能性

点灯直前のレーザー集光点付近のキセノンガス領域でレーザー光のエネルギーを吸収し得る物質は、電子・キセノン原子（中性・励起状態）・キセノンイオン・ターゲット中のタングステン原子や酸化バリウム（分子・微粒子）が考えられる。自由電子は自由-自由遷移である逆制動放射によって、原子・イオン・微粒子に内包される束縛電子は束縛-束縛または束縛-自由遷移によってレーザーのエネルギーを吸収する。レーザー光がこれらの過程により吸収される割合を見積もるため、プラズマの透過率と分光透過率を実験的に測定し、かつ理論的な計算により評価する。

まず、自由電子の逆制動放射によるレーザー光の吸収率を求めるために、白色光と 980 nm の 2 種のレーザー光のプラズマの透過率を同時に測定した測定系を図 2-12 に示す。白色のプローブ光としては、スーパーコンティニウム（以下、SC）光源（YSL Photonics 製 SC-

5、出射スペクトル：700~2000 nm）からの SC 光をプラズマ中心部に平行光で入射し、透過パワーをパワーメーター（Ophir Optronics Solutions 製 L50(300)A、有効口径:65 mm）で測定した。980nm のプローブ光としては、点灯用のレーザー（レーザー出力：35W）を用い、その透過率をランプの出射側に上記と同じパワーメーターを設置して測定した。測定は、レーザー加熱前・レーザー加熱中・点灯 5 分後の 3 回行った。ターゲットによるレーザー光の散乱やプラズマ自体の発光の影響は SC 光の有無による差分を取って除去している。

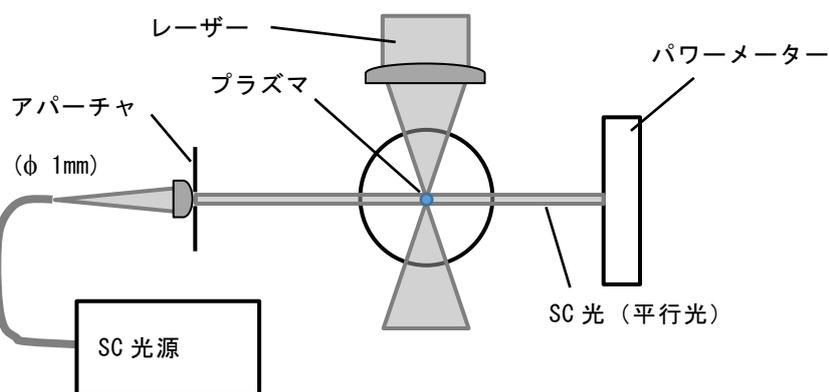


図 2-12 プラズマの透過パワー測定の様式図

プラズマの位置における SC 光とプラズマの寸法をそれぞれの発光ピーク強度の半値の範囲で比較した結果、SC 光の 12.4%はプラズマを通過せずに素通りしているため、ランプへの SC 入射光の 750 mW に対し、プラズマを通過する入射パワーを  $750 \text{ mW} * (1-0.124)=657 \text{ mW}$  とした。SC 光はランプを構成している石英ガラス面を 4 回通過し、当該波長域での屈折率約 145 から 1 面当たりの反射率が 3.4%であるため、この反射損失(12.8%)を除いたものをプラズマ透過率とした。透過パワーは、このプラズマ透過率を考慮した数値である。

表 2-4 SC 光のプラズマの透過率

	入射パワー (mW)	透過パワー (mW)	透過率
加熱前	657	537	93.8%
加熱中	657	537	93.8%
点灯後	657	517	90.3%

結果を表 2-4 に示す。加熱前と加熱中の透過率には変化が見られなかったが、点灯後は透過率が 93.8%から 90.3%に低下した。プラズマ鉛直上方の散乱率が測定限界の 0.1%以下であったことから散乱率は無視できる。これらの結果から、加熱中の透過率 93.8%で点灯後の透過率 90.3%を割って 1 から引くことで、プラズマによる SC 光の吸収率を算出すると、3.7%となった。

一般にレーザー生成プラズマではプラズマ中の電子の逆制動放射によってレーザー光がプラズマに吸収されると理解されているため、その吸収率を計算して測定値の 3.7%と比較する。逆制動放射によるプラズマ中のレーザーの吸収率  $\alpha$  を Shkarofsky の公式 (式 1) <sup>10</sup> に従って計算した。cは光速、 $\omega$ は印加電界の角周波数、Gはガウント因子、kはボルツマン定数、Tは電子温度、 $\hbar$ はプランク定数を  $2\pi$  で割った値である。nS<sub>0</sub>は、式 2 で与えられる。n<sub>+</sub>はイオン密度、Zはイオン価数、mは電子の質量、 $\epsilon_0$ は空間の誘電率である。計算では平均プラズマ温度をスペクトルフィッティングから 6,500 K とし、電子密度は Saha の式 (式 3) <sup>11</sup> に従って算出し、プラズマによる吸収長は実測値から 500  $\mu$ m とした。X = n<sub>e</sub>/n を電離度として、n は中性分子とイオンの数密度の和、n<sub>e</sub>は電子の数密度、h はプランク定数、T は温度、Iは イオン化エネルギーである。入射波長は、SC 光の最大出力波長である 1100 nm を用いた。その結果、吸収率は 3.5%となり、実測値の 3.7%とほぼ一致した。

$$\alpha = \left(\frac{\pi c}{\omega}\right)^2 \frac{nS_0 G}{kT} \left(\frac{1 - e^{-\frac{\hbar\omega}{kT}}}{\frac{\hbar\omega}{kT}}\right) \dots\dots\dots(1)$$

$$nS_0 = \frac{16}{3} \frac{(n_+ n Z^2)}{m^2 c^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^3 \left(\frac{2\pi m}{3kT}\right)^{0.5} \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{X^2}{(1-X)} = \left(\frac{1}{nh^3}\right) (2\pi m k T)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{I}{kT}} \dots\dots\dots(3)$$

それに対し、もう一方の点灯用の 980 nm のレーザー光のプラズマ透過率の測定結果は 28%であり、プラズマで 72%が吸収されていた。プラズマ鉛直上方の散乱率が測定限界の 0.1%以下であったことから散乱率は無視できる。これらの結果から、ターゲット加熱中は電子やキセノン原子の励起・イオンは透過率による測定で検出できるレベルでは発生していないこと、点灯中のレーザー光のプラズマによる吸収のうち、逆制動放射の寄与は小さく、他のメカニズムによる吸収が支配的であることが確認された。

次に、キセノン原子・イオン内の束縛電子によるレーザー光の吸収率を求めるために、プラズマの分光透過率を測定した測定系を図 2-13 に示す。前述の透過率評価と同様、加熱

前・加熱中・点灯後の3条件に対する測定を試みたが、加熱中は加熱によるガスの対流により安定した測定が難しく、ここでは点灯後のデータから手がかりを得ることにした。加熱前の透過スペクトルは点灯後の分光透過率を得る際の分母として利用する。

プローブ光として SC 光をプラズマ中心部に平行光で入射し、透過光の中心部分をアパーチャで切り取り (NA=0.066)、分光器 (Spectra Corp 製 Solid Lambda) で分光透過率を測定した。入射レーザーパワー35 W のレーザー生成プラズマに加えて、リファレンスとして 75 W キセノンランプ (浜松ホトニクス製 L2174/5.4 Adc 点灯) も同様に測定した。キセノンランプにはレーザー光を入射していない。

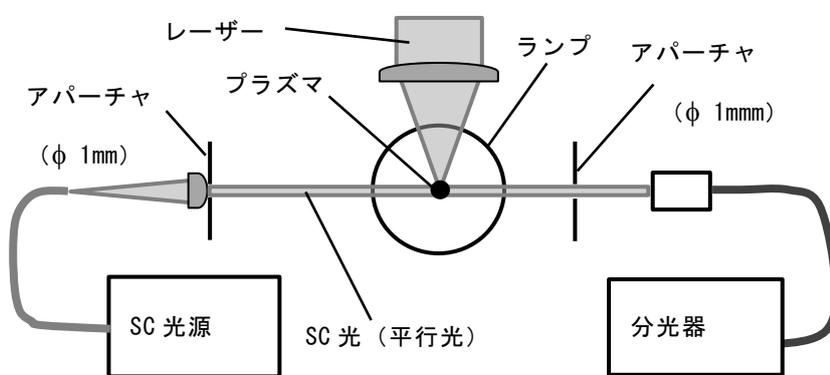


図 2-13 プラズマの分光透過率測定の様式図

図 2-14 にプラズマの分光透過率測定の結果を示す。プラズマの分光透過率の測定結果がパワーメーターで測定した透過率の結果と比べて低いのは、SC 光がプラズマでの屈折によりパワーメーターと比べて小さい分光器側のアパーチャ径以上の大きさに広がったためである。また、キセノンランプとレーザー生成プラズマの透過率も異なるが、ランプやプラズマの形状・大きさが異なるため、ここではスペクトルの構造のみに着目して議論する。

キセノンランプの吸収スペクトルは、823 nm、882 nm、980 nm (図 2-14 中の各矢印) などキセノン原子の吸収線がはっきり観察された。各波長のそれぞれのエネルギー準位は、823 nm が下準位  $5P^5(^2P_{3/2})6s^2(3/2)$  : 上準位  $5P^5(^2P_{3/2})6p^2(3/2)$ 、882 nm が下準位  $5P^5(^2P_{3/2})6s^2(3/2)$  : 上準位  $5P^5(^2P_{3/2})6p^2(5/2)$ 、980 nm が下準位  $5P^5(^2P_{3/2})6s^2(3/2)$  : 上準位  $5P^5(^2P_{3/2})6p^2(1/2)$  であり、NIST Atomic Spectra Database においても、非常に強い輝線・吸収線の確認されている波長である。一方、レーザー生成プラズマにおいては、これらの吸収線波長の吸収率は明らかに低いことが分かる。この差異を手がかりにレーザーからプラズマへのエネルギー輸送について考察する。

キセノンランプにおいて、原則的にキセノン原子の励起状態はそのプラズマ温度に応じたボルツマン分布に従う。先ほど指摘した 823 nm、882 nm、980 nm などのキセノン原子の主要な吸収線はキセノンランプからの放射スペクトルにおいては輝線であり、いずれも共通の下準位  $5P^5(^2P_{3/2})6s^2(3/2):8.315 \text{ eV}$  を持つ<sup>12</sup>。この準位  $5P^5(^2P_{3/2})6s^2(3/2)$  は、寿命が 150 秒と非常に長い準安定状態であり、ボルツマン分布よりも高い存在確率までこの準位の原子密度を蓄積できる<sup>13</sup>。そのため、この準位を下準位とした多くの励起が可能な状態であり、SC 光の吸収率が高かったと推測される。

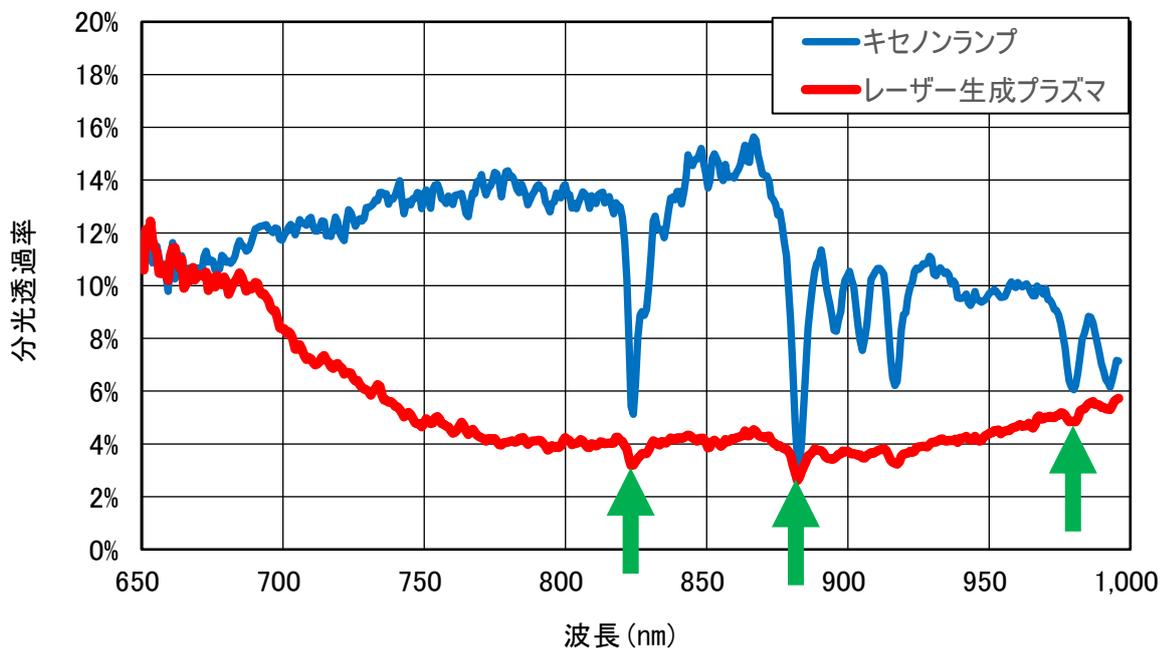


図 2-14 プラズマの分光透過率

一方のレーザー生成プラズマもその温度に応じたボルツマン分布に従って準位  $5P^5(^2P_{3/2})6s^2(3/2)$  が生成される。入射されるレーザー光の 980 nm はキセノン原子のその準位を下準位とする輝線に相当するため吸収が大きい。よって、準位  $5P^5(^2P_{3/2})6s^2(3/2)$  は生成とほぼ同時にレーザー光を吸収して遷移するために、キセノンランプと比べてレーザー生成プラズマのキセノン原子の吸収線波長における SC 光の吸収率が低かったと推測される。この結果と、レーザー光の吸収率 72% という実験値、及び逆制動放射による吸収率 3.5% という計算結果から、レーザー光の吸収はこの束縛-束縛遷移が支配的であることが分かった。

この様に入射レーザーによって下準位が常に消費されている状態では点灯前もこの下準位はほとんど存在していなかったと考えられる。また、キセノンガス中にレーザーを集光

照射しても点灯せず、タングステン製のターゲットでも点灯しない。これらのことからキセノン原子が点灯の直接的な原因とは考えられない。

以上の結果をまとめると、ターゲットから放出される自由電子、キセノン原子の励起やイオン化はプラズマの生成にほとんど寄与しておらず、点灯の直接的な原因とは考えられない。ターゲットの構造物であるタングステンは単体では点灯しなかったことから、これも点灯の直接的な原因とは考えられない。従って、他に考えられる点灯の直接的な原因となるのは、ターゲット内の酸化バリウムがキセノンガス領域に放出され、レーザー光を吸収するという過程だけである。

そこで最後に、点灯前に酸化バリウムが、いつどのような状態でキセノンガス領域に放出されているかを理解するために、点灯前後のプラズマ発光を測定・分析した。その測定系の模式図を図 2-15 に示す。バリウム原子の輝線を観察できる様に 550 nm バンドパスフィルタ（半値幅 10 nm）を入れた高速度カメラ（Photron 製 FASTCAM Mini）を用いてレーザー加熱開始からプラズマ発光後までの挙動を 250 fps で撮影した。同時に、プラズマからの発光を f60 のレンズで集光し、途中にコールドミラー（オプトライン製 CM1）でプラズマにより散乱されたレーザー光を減衰させて分光器（Spectra Corp 製 Solid Lambda）のファイバーに入射して、その分光スペクトルを 70 ミリ秒ごとに測定した。入射レーザーパワーは 50 W で、集光条件は 2.4 節と同じ  $f=25\text{ mm}$ /開口数 $=0.417$  である。

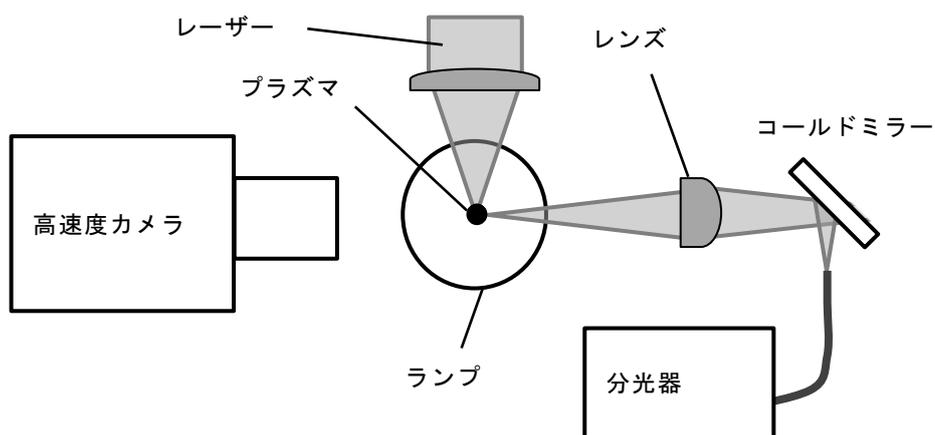


図 2-15 プラズマの分光スペクトル測定の模式図

高速度カメラによる測定結果から、レーザーによるターゲット加熱の開始から点灯直後までの状態は、以下の3つの時間帯に分けられる。

1. ターゲット加熱前期：レーザー加熱開始後から微小なプラズマ発生までの時間（0秒から5.1秒まで）。撮影波長550nmの発光は見られなかった。

2. ターゲット加熱後期：微小なプラズマ発生からキセノンプラズマ発光までの時間（5.1秒から8.4秒まで）。直径約200 $\mu\text{m}$ のプラズマ発光がレーザー集光点付近からキセノンガス領域側に見られた。（図2-16左）

3. 点灯直後：点灯後から1秒以内（8.4秒から9.4秒）。直径約15mmのプラズマ発光がレーザー集光点からキセノンガス領域側に見られた。（図2-16右）

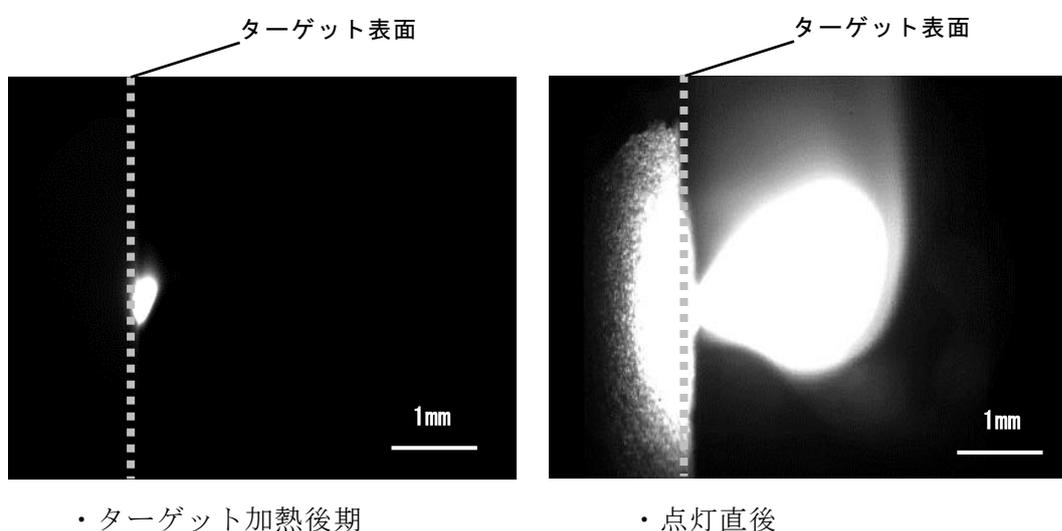


図2-16 プラズマの高速度カメラ画像（レーザーは右側から照射）

分光測定の結果を図2-18に示す。ターゲット加熱前期は入射レーザー波長（図2-17中の黒色矢印）以外のスペクトルは観察されなかった。ターゲット加熱後期は458nm、553nmなどのバリウム原子と、494nmなどのバリウム1価イオンの輝線スペクトル（図2-17中の赤色矢印）が観察された。その後、点灯直後には823nmなどのキセノン原子の輝線スペクトル（図2-17中の青色矢印）と、点灯前と同様のバリウム原子とバリウム1価イオンの輝線スペクトルが観察された。これらの結果から、レーザー加熱後期にはレーザー集光点付近のターゲットからキセノンガス領域にバリウムが放出されていること、及び放出されたバリウムには励起・イオン化しているものがあることが確認された。

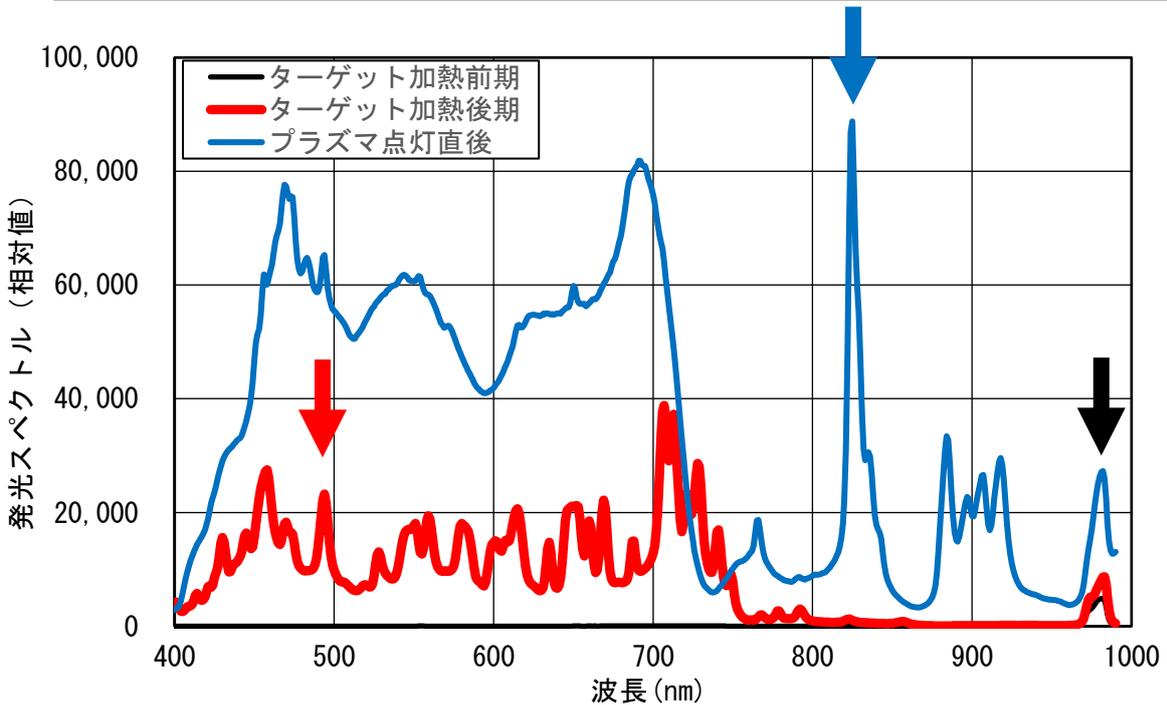


図 2-17 プラズマ発光の分光スペクトル

#### 2.5.4. 点灯メカニズムの仮説

今回の実験で点灯した領域のパワー密度 ( $1.4 \times 10^6 \sim 3.9 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ ) のレーザー加熱により金属表面に熔融池が生成され、そこから微粒子が放出されることは、レーザー溶接分野において明らかにされている<sup>14</sup>。この先行研究と前節までの測定結果から、点灯メカニズムに関する仮説を以下に提案する。

最初にレーザー加熱によりターゲット温度が上昇し、ターゲット表面に熔融池が生成される。レーザー集光点のターゲット温度が閾値を超えると、酸化バリウムの分子もしくは微粒子がキセノンガス中に放出される。この放出された物質がレーザー光を吸収した結果、大量の電子を放出する。さらに、その電子が逆制動放射によりレーザー光のエネルギーを吸収することで、周囲のキセノン原子に多大なエネルギーを供給してプラズマ化する。

この仮説から、ターゲットから放出された物質が点灯の直接的な原因となるためには、易電子放出物質の仕事関数の低いことが重要であると推測され、その妥当性は実験で確かめられた。しかし、キセノンガス中の各粒子のエネルギーと電子の流れについては、より高速な分光分析による微粒子の挙動の解析が有効と考えられ、今後の検証が期待される。

2.5.1 項において検討した、点灯メカニズムをレーザー集光点付近のキセノンガスへのエネルギーの流れに関しては、この仮説から①レーザーのエネルギーを吸収したターゲット表面からの加熱、かつ②レーザーからの直接加熱によるレーザー集光点付近のキセノンガス領域の物質のエネルギー供給が必要であると言える。

## 2.6. 装置の小型化

ターゲット方式レーザー生成プラズマ光源のもう一つの課題である、点灯させるために高いレーザーパワーが必要で装置が大型になるという点について、前節までの研究結果により、従来 kW 級のレーザーが必要だったものを、100 W 以下のレーザーで点灯することが可能となった。この結果を踏まえた上で、更なる装置の小型化の限界をここで見極める。

光源装置は、市場要求を考慮して水冷ではなく強制空冷で設計した。搭載した半導体レーザー（Laser diode, 以下、LD）の基本仕様は、最大出力約 60W、出力中心波長約 976 nm である。ランプは直動式ステッピングモーターで移動させて点灯する。1 次試作機は、LD 制御部とランプハウスとコントローラの 3 つの筐体を分けて設計した。その外観写真を図 2-18 に、外形寸法図を図 2-19 に示す。図 2-18 の中心にある LD 制御部に、LD とその制御部、電源などが内蔵されている。LD 出力光はファイバーで左側のランプハウスに導光されている。ランプハウスは、ランプとランプ駆動部、LD 光の集光光学系から成る。右側のコントローラでランプの ON/OFF などを制御する。

この 1 次試作機を使用して、出力光とプラズマの諸特性、各部の温度、必要な温度制御範囲などを確認し、装置の小型化の可能性を検討した。その結果、1 次試作機と比べて容積比で 55%の小型化が可能であることを確認し、それに基づいた 2 次試作機を試作した。2 次試作機では、ランプハウス部と本体を一体化し、コントローラを内蔵し、かつ外部制御機能も追加している。この光源の諸特性については、次節において述べる。

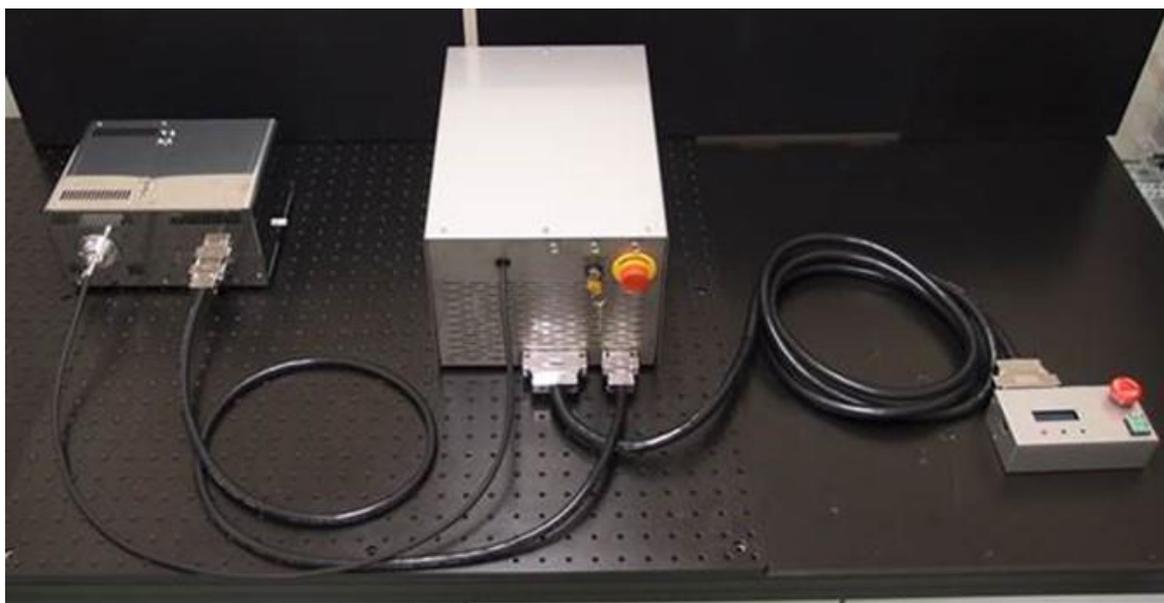


図 2-18 1 次試作機外観写真

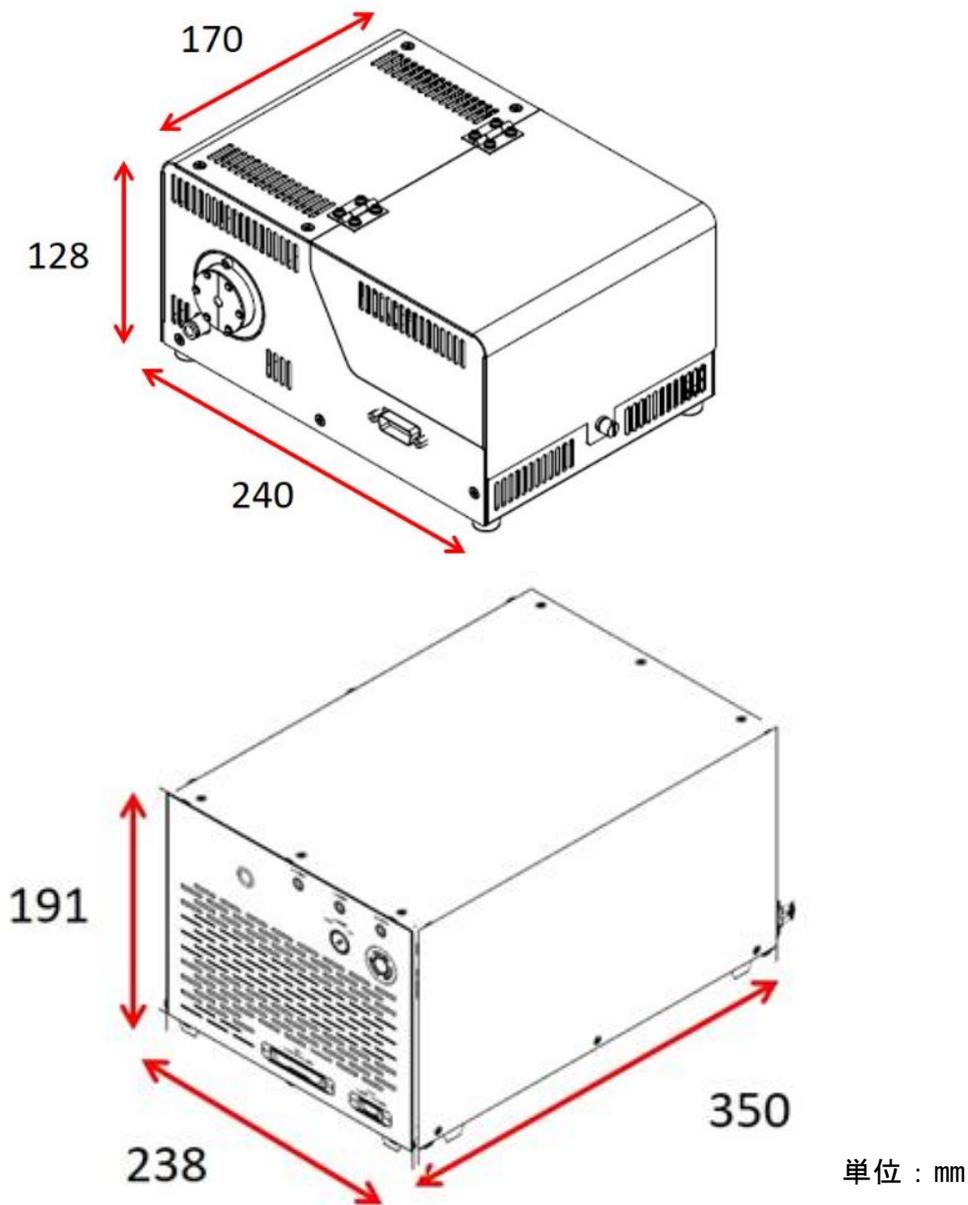


図 2-19 1次試作機外形寸法図

## 2.7. 開発した光源の仕様

顧客ニーズと各光源の仕様をレーダーチャートとして図 2-20 に示す。灰色の範囲は顧客ニーズを、青色の範囲は従来のキセノンランプを、緑色の範囲は競合他社製品を、赤線は1次試作機を元に開発した2次試作機の仕様を示す。このレーダーチャートから、2次試作機において、顧客ニーズを満足したしていることが確認できる。この仕様の詳細について、以下において確認する。

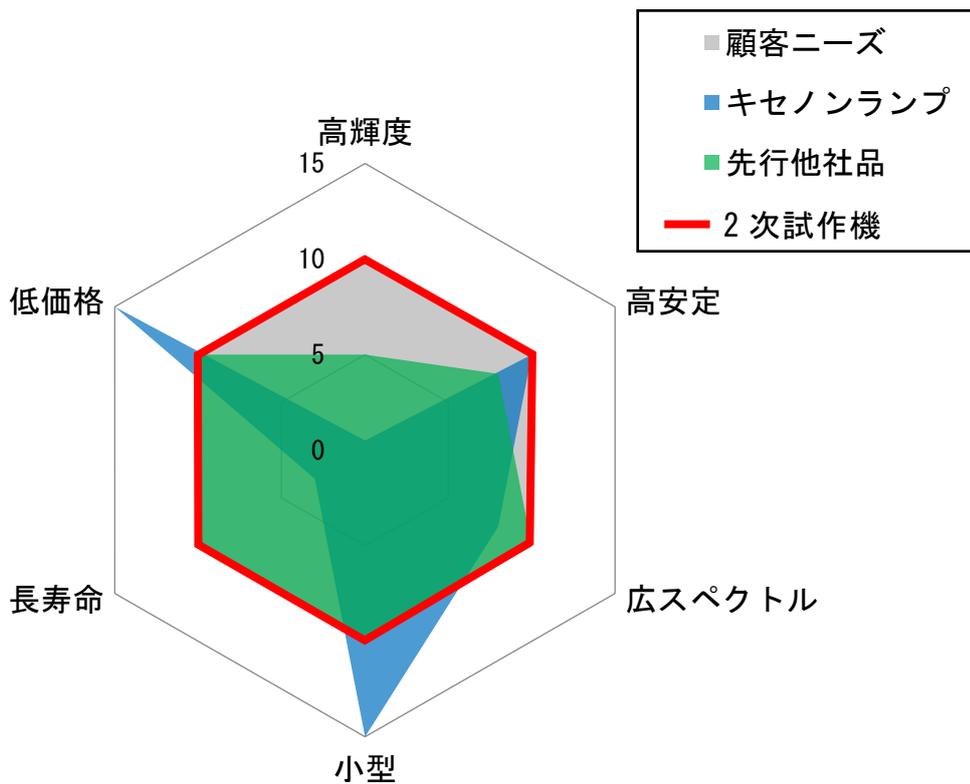


図 2-20 顧客ニーズと各光源の仕様

1次試作機を元に開発した2次試作機について、スペクトルと分光放射輝度、光出力安定性、及び繰り返し点灯性能を測定した。最初に、分光放射輝度を以下の条件と方法で測定した。

1. セットアップ A (図 2-21) で、550 nm の波長のプラズマ形状と輝度分布を測定し、輝度分布を積分する。この測定結果は、図 2-22 に示す。

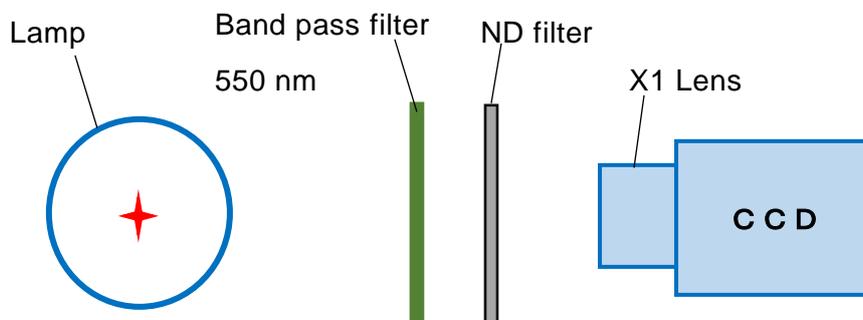


図 2-21 セットアップ A

2. 輝度分布から、X 軸と Y 軸の最大輝度値の画素を中心とした輝度値の FWHM(半値全幅、full width at half maximum)を求める。
3. FWHM の長方形の範囲の輝度値を積分する。
4. 3 で求めた積分値を、1 で求めた積分値で割る。

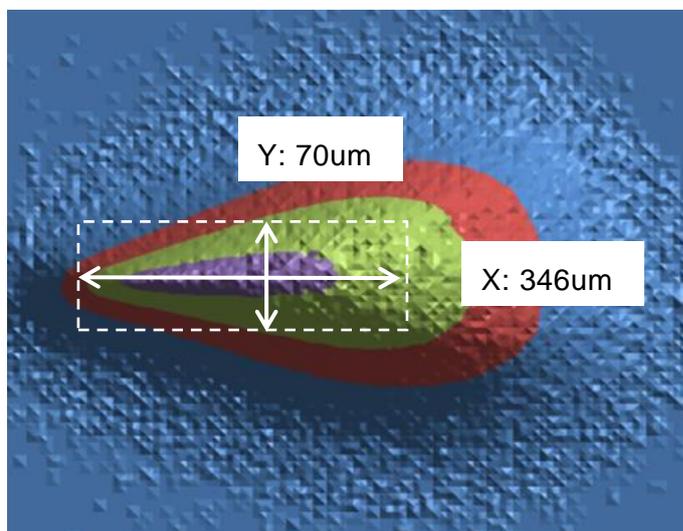


図 2-22 プラズマ形状

5. 次にエタンデュを求める (図 2-24)。エタンデュは、放出面積 (輝度値の FWHM の面積) と立体角の積である。

セットアップ B (図 2-23) における、プラズマ (Source) とファイバー先端 (Detector) の距離と分光器のファイバコアの直径から立体角を計算する。

検出器側 :  $1.27\text{E}-2$  sr

ソース側 :  $3.14\text{E}-6$  sr

次に、セットアップ A における立体角と FWHM の面積の積でエタンデュを得る。

\*セットアップ B の検出器のファイバコアが大きいため、制限エタンデュがプラズマ (Source) 側になる。

検出器側 :  $9.97\text{E}-2\text{mm}^2 \cdot \text{sr}$  ( $\Phi 1\text{mm}$ )

ソース側 :  $7.64\text{E}-8\text{mm}^2 \cdot \text{sr}$  ( $70\mu\text{m} \times 346\mu\text{m}$ )

6. 校正されたランプ光源データを使用して、セットアップ B のスペクトルデータを分光放射照度に変換する。

7. 6 からのデータの積と、セットアップ A からの積算強度の比を計算する。

\*セットアップ B のスペクトルデータはプラズマ全体からのものなので、データは FWHM のスペクトルデータに変換される。

8. 上記のデータをエタンデュで除算する。

\*単位は、式から  $\text{mW}/\text{mm}^2/\text{nm}/\text{sr}$  である。

(分光放射強度 :  $\text{mW}/\text{nm}$ 、エタンデュ :  $\text{mm}^2 \cdot \text{sr}$ )

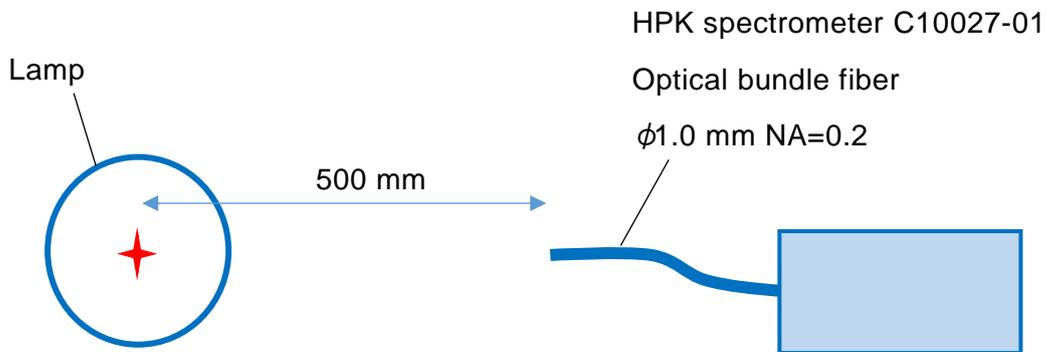


図 2-23 セットアップ B

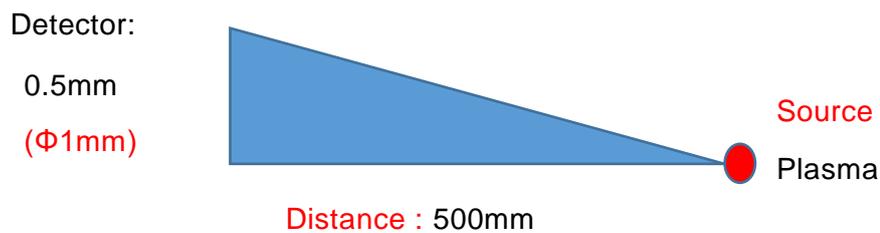


図 2-24 エタンデュの測定方法

計算した分光放射輝度の結果を図 2-25 のグラフに示す。作製した 2 次試作機は、75 W キセノンランプと比べて波長 250 nm において 20 倍、競合他社製品と比べて波長 250 nm において 2 倍の分光放射輝度を得た。また、200~2,000 nm に渡り、フラットなスペクトルである。これらは、顧客ニーズを満たすスペクトルと輝度である。

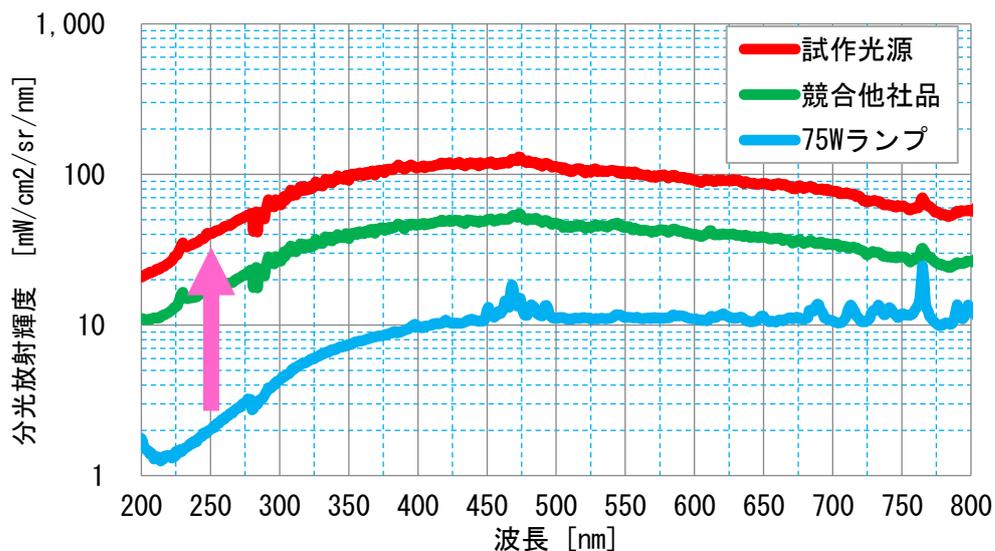


図 2-25 各光源の分光放射輝度

次に、キセノンランプの光出力安定性を図 2-26 に、2 次試作機の光出力安定性を図 2-27 に示す。安定性は、550 nm の光出力をシリコンフォトダイオードで受光し、IV 変換アンプで電圧変換してオシロスコープで測定した。その測定系を図 2-28 に示す。測定の結果、どちらの安定性も 0.2%p-p 以下であり、光出力安定性に関しても顧客ニーズを満たすレベルであることを確認した。

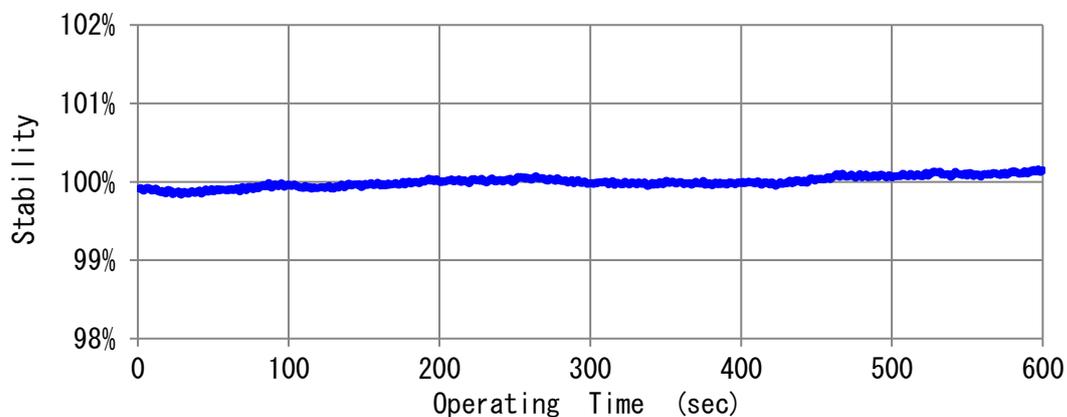


図 2-26 75W キセノンランプの光出力安定性

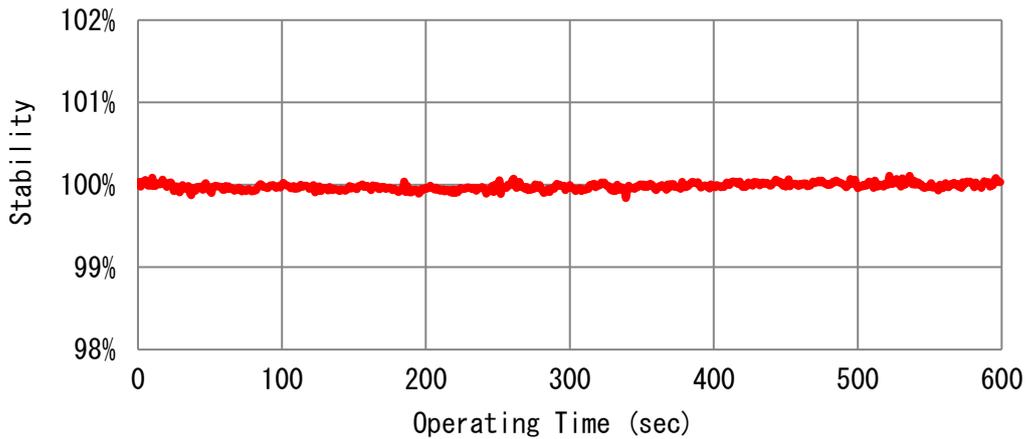


図 2-27 レーザー生成プラズマ光源 2 次試作機の光出力安定性

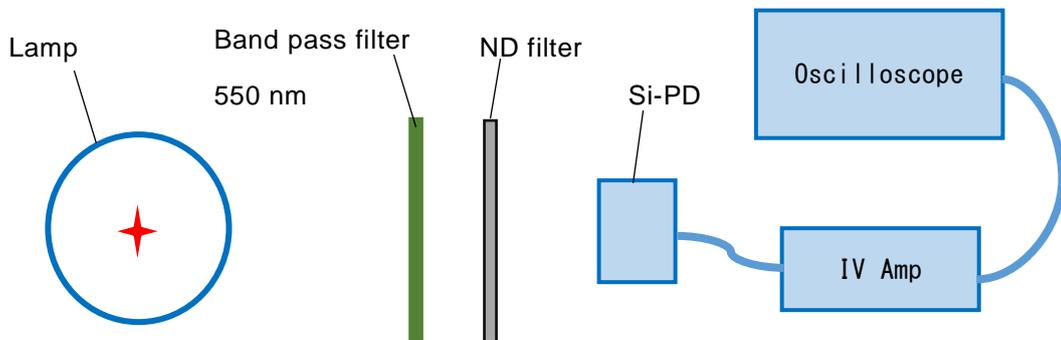


図 2-28 光出力安定性の測定方法

最後に、ランプの繰り返し点灯性能について、2次試作機においてランプを点灯し、図 2-23 の測定系にて分光放射照度を測定し、点灯毎の分光放射照度の相対値により評価した。出荷前の検査や調整を想定して点灯 5 回目を 100%として、点灯 10 回目までの全点灯と、点灯 10～50 回目までの 5 回毎の点灯を測定し、250 nm, 550 nm, 780 nm の 3 波長について、測定結果をプロットした。そのグラフを図 2-29 に示す。

この測定の結果、点灯 50 回目においても、波長 250 nm で光出力 80%以上を維持しており、50 回以上の点灯が可能であると確認された。ターゲット市場である半導体検査装置市場においては、通常 365 日 24 時間連続稼働であるため、ランプの点灯はランプ交換時と年数回の定期点検や異常停止時のみであり、市場で要求される点灯回数は 50 回以下である。ここから、顧客ニーズを満たす点灯回数寿命であると確認した。

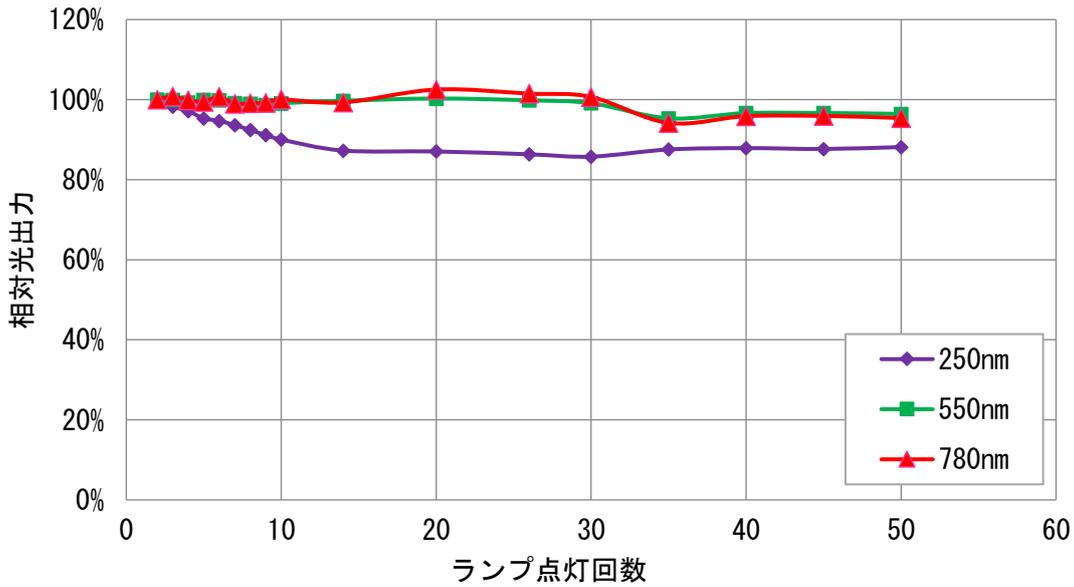


図 2-29 ランプの繰り返し点灯性能の評価結果

## 2.8. 従来光源との仕様の比較

これらの試作機的设计開発の成果と点灯性に関する研究結果から、ターゲット方式レーザー生成プラズマ光源のキセノンランプや放電方式レーザー生成プラズマ光源との価値を相対的に比較する。図 2-30 に相対輝度と相対価格、図 2-31 に相対輝度と相対装置容積を、それぞれグラフ化した。グラフの各項目ともに、75W キセノンランプを 1 とした場合の相対値で示す。輝度の比較は、市場要求の多い波長 250nm において行う。

キセノンランプは、35 W から数十 kW まで幅広いラインナップで市販されているが、ここでは主に使用されている 75 W から 300 W までのランプを示した。キセノンランプは最も小型安価であるが、輝度の上限はおおよそ 4 である。

放電方式レーザー生成プラズマ光源は、LD 出力が 10 W でも点灯が可能であることから、LD 出力が 10 W から 100 W と仮定してグラフに示した。この光源は、キセノンランプとほぼ同等からおよそ 100 倍の輝度が得られ、LD 出力に応じて価格は高くなり、装置容積も大きくなる。輝度の幅広さとキセノンランプと比べて輝度の割に装置容積が小さい点が特長である。

これらに対し、ターゲット方式レーザー生成プラズマ光源は、LD 出力が 35 W 以上必要であることから、LD 出力が 40W から 100W と仮定してグラフに示した。この光源は、キセノンランプと比べておよそ 20 から 100 倍以上の輝度が得られ、LD 出力に応じて価格は高くなり、装置容積も大きくなる。例えば、2次試作機は、競合他社製品と比べて同程度の価格で 2 倍の輝度は得られたが、装置容積も 2 倍になっている。この様に放電方式レー

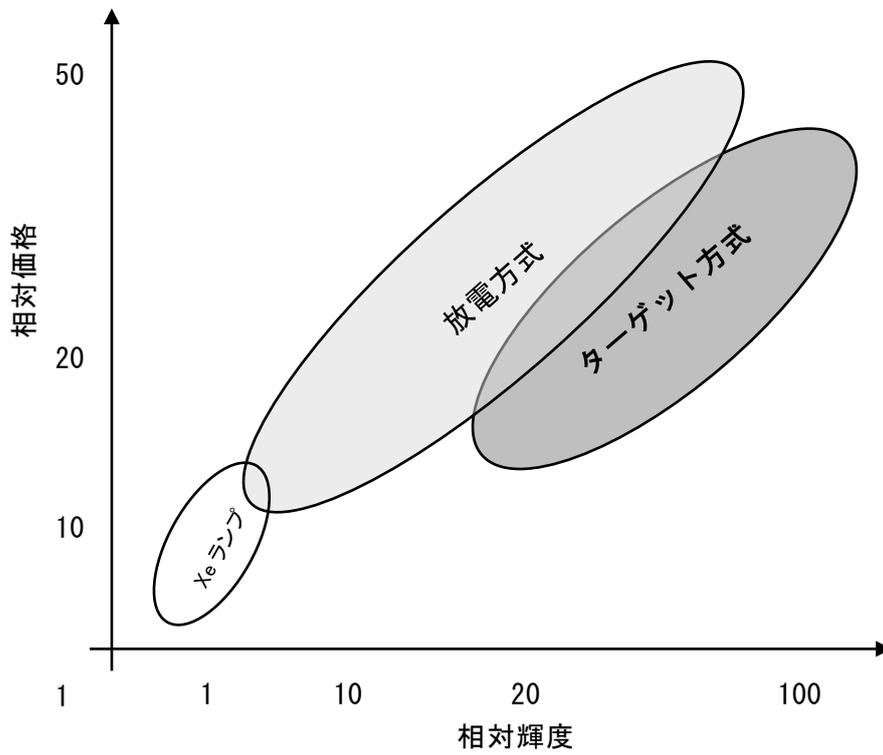


図 2-30 相対輝度と相対価格の比較

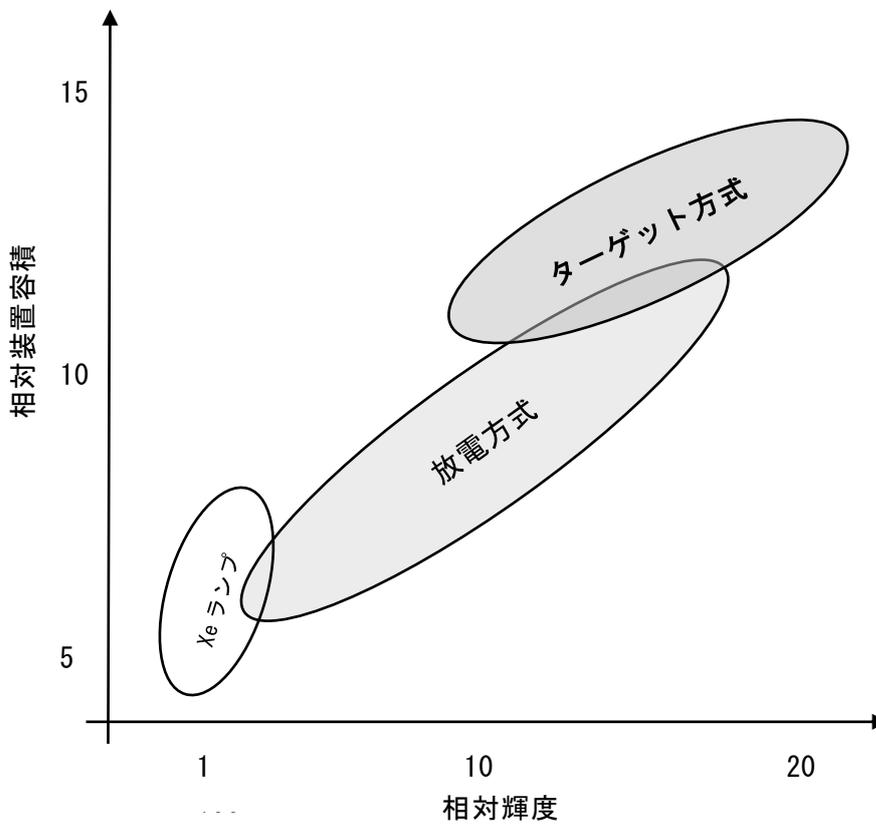


図 2-31 相対輝度と相対装置容積の比較

レーザー生成プラズマ光源と比べて価格の割に輝度の高い点灯が特長である。しかし、35 W 未満では点灯できないためキセノンランプよりも 20 倍以下の輝度が欲しいニーズに応えられない点、ランプ駆動系が追加で必要となり装置が大きくなる点には欠点がある。

以上の結果をまとめると、ターゲット方式レーザー生成プラズマ光源は半導体検査装置市場において、上位機種において求められるニーズに応えることは可能性が高く、有用性が確認できた。加えて、これ以外の領域を確保するならば、新たな技術の獲得が必要であることが明らかになった。

## 2.9. まとめ

本研究によって、ターゲット方式のレーザー生成プラズマ光源を世界で初めて実用的な装置として開発した。その結果を以下にまとめる。

i) 従来のターゲット形状をワイヤー形状から円柱状にすることで体積を増やし、点灯時のターゲットへのダメージを軽減させた。その結果、複数回の点灯が可能になった。また、ターゲットからの熱電子放出の重要性を見出したことによって、仕事関数の低いトリタンとバリウム含浸タングステンがターゲット材料に適していることを実験的に示し、従来のタングステンでは kW 級のレーザーが必要であったものを、35 W と大幅に低いレーザーパワーで点灯できるようになり、ターゲット方式の課題を解決して実用化への目処を立てた。

ii) 同条件でターゲットを加熱し、その点灯までの時間を測定することで点灯条件を定量化できた。その結果、バリウム含浸タングステンの点灯性が今回実験した物質の中では最も優れていた。複数回の繰り返し点灯が可能であることもバリウム含浸タングステンにおいて実証した。

iii) 点灯のメカニズムについて、以下の仮説を提案した。

1. レーザー加熱によりターゲット表面に溶融池が生成される
2. そこから酸化バリウムの分子もしくは微粒子がキセノンガス中に放出される
3. それがレーザー光を吸収した結果、大量の電子を放出する
4. その電子が逆制動放射によりレーザー光のエネルギーを吸収することで、周囲のキセノン原子に多大なエネルギーを供給してプラズマ化する

この仮説から、ターゲットから放出された物質が点灯の直接的な原因となるためには、易電子放出物質の仕事関数の低いことが重要であると推測される。このメカニズムの解明については、より高速な分光分析による微粒子の挙動の解析が有効と考えられ、今後の検証が期待される。

iv) ターゲット方式レーザー生成プラズマ光源としては、過去に例を見ない小型で高輝度の光源装置を開発した。これは、本光源としては世界で初めての実用的な装置である。本光源は半導体検査装置市場において、上位機種において求められるニーズに応えられる可能性が高く、光源装置としての有用性が確認できた。

ターゲットに必要な仕様は、レーザーパワーを効率よく吸収・蓄積できる形状と、レーザーによる溶融によって適切な量の易電子放出物質をレーザー集光点付近に放出できる材料であることと推測する。

形状については、今回の様なヒートダム構造は有効である。材料については、今回点灯が確認できたトリタンとバリウム含浸タングステン以外にも、カルシウム・ストロンチウムなどのアルカリ土類金属元素酸化物・ランタン・ネオジウムなどの希土類元素酸化物・イットリウム酸化物・スカンジウム・レニウムなどを含んだタングステン・モリブデンなどの高融点物質や、 $C_{12}A_7$ エレクトライドなどのエレクトライドなどが考えられる。

本方式のレーザー生成プラズマの今後の課題としては、点灯回数寿命の改善やレーザー波長・レーザー入射角・ガス圧などの最適化が挙げられる。これらの要素についても、今後の検証と検討が期待される。

## 第2章 参考文献・引用

1. Radziemski, L. J., & Cremers, D. A. (1989). *Laser-induced plasmas and applications*, Marcel Dekker.
2. 浜松ホトニクス株式会社, 白色パルス発生装置, Japan Patent Kokai, 1992-144053.
3. Carlhoff, C., Krametz, E. Shafer J. H., schildbach K., Uhlenbusc J. h & Wroblewski, D. (1981). Continuous optical discharges at very high pressure, *Physica*, 103C, p.439.
4. 古谷博秀・齊藤剛 (2008) 「レーザー生成プラズマの電離ダイナミクスと構造」 *Journal of Plasma Fusion Research*, Vol. 84, No. 6, pp.362 - 368.
5. 日下和夫・佐藤政裕・只野真・長谷川恵一・熊川彰長・高橋秀明・中島昭二 (2004) 「環境適合型推進剤のレーザー着火特性 —GO2/GH2 および GO2/GCH4 推進剤—」 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-03-018, 114.
6. 佐伯紘一 (2003) 「熱陰極放電プラズマ」 *J. Plasma Fusion Res.* Vol.79, p.1242.
7. フォメンコ (1973) 『電子放出特性便覧』 日ソ通信社.
8. 日本化学会編 (1993) 『改訂4版 科学便覧 基礎編』 丸善出版株式会社.
9. 中川靖夫・大谷文雄・谷治環 (1986) 「白色拡散面の紫外・可視・近赤外域での分光反射特性」 照明学会誌, Vol.70, p.545.
10. Shkarofsky, I. P., Johnston T. W. & Bachynski, M. P. (1966). *The particle kinetics of plasmas*, Addison-Wesley.
11. Saha, M. N. (1920). Ionization in the solar chromosphere, *The philosophical Magazine*. 40. 472.
12. Meggers W. F., & Humphreys, C. J. (1934). Interference measurements in the spectra of noble gases, *Part of journal of research of the national bureau of standards*, Vol.13, p.293.
13. 原田義也 (2005) 「準安定励起原子利用研究の概要と現状」 真空, Vol.38, p.397.
14. 新井武二 (2007) 『レーザ加工の基礎工学』 丸善出版株式会社.

## 第3章 半導体検査装置市場の分析とレーザー生成プラズマ光源の事業戦略の立案

### 3.1. はじめに

本章では、開発したターゲット方式レーザー生成プラズマ光源（以下、本光源）の半導体検査装置市場における持続的競争優位性を高めるための事業戦略を立案する。そのために、戦略に関する先行研究を調査し、ターゲット市場である半導体検査装置市場の動向と、プレイヤーの経営戦略を分析する。その上で、本光源についてリソース・ベースド・ビューとポジショニング・ビューの両方の視点で戦略を立案する。まず、筆者の所属企業であるX社の現状と、ターゲット市場である半導体検査装置市場の背景を概観する。

先端技術産業に携わる日本企業を俯瞰すると、自社開発の技術による製品の差別化にこだわることで市場競争を戦おうとする技術偏重の考え方が支配的で、顧客ニーズを聞き取ることや顧客の視点・視野・視座で事業を構想できないという課題を持つことが散見される。そのため、特に家電産業を中心に、デジタル化によるコモディティ化が進んだ製品群においては、技術による製品の差別化は非常に困難になり、顧客への訴求力を失っていった<sup>1</sup>。また、B to B(Business to Business)ビジネスにおいては、カスタム製品が多いために顧客ニーズというインプットがあって初めて製品開発がスタートし、製品化までに長期間が必要となり、ビジネスのスピードが遅くビジネスの拡大率が低く収益率も上がらないという課題があった。

X社においても、これまで自社開発の技術へのこだわりが強く、顧客から要求された仕様に従った製品開発が多いために、技術開発や製品化のスピードが非常に遅いという課題があった。それ故、現在の早いスピードで変化する顧客要求に追いつかず、最悪のケースでは、開発当初の顧客要求仕様のレベルが開発期間中に市場要求や競合他社の動向によって高くなり、結果として開発が頓挫することまで見られる様になっていた。また、研究開発などのリソース不足のために、選択と集中が迫られているものの、経験や情報が不足しているため、適切な選択ができなかった。

以上のことから、X社では新製品開発の戦略を、これまでとは別のアプローチでスピーディーに立てる必要性に迫られている。この現状を踏まえ、本研究対象のレーザー生成プラズマ光源についても、これらの課題に直面することが明らかであったことから、本光源の主要な市場である半導体検査装置市場に対する事業戦略を立案することとした。

半導体検査装置が検査する半導体デバイスは、1970年以降、ムーアの法則に従って 18

ヶ月に2倍の速度で微細化・高集積化が進んでいる。この法則の実現は、様々な技術革新によって支えられてきた<sup>2,3</sup>。特に近年、半導体パターンが1x nmや7 nmノードに微細化・高集積化し、膜総数も増え、ウェハサイズが300 mmや450 mmに大型化したことによって、ウェハの単価が非常に高額となっている。そのため、ウェハの歩留まり向上を加速させ、収量を最大化することは、現代の半導体製造にとって非常に重要な目標である。この中において、半導体ウェハの検査装置には単にウェハの不良を検出するだけでなく、その原因を特定し製造工程にフィードバックすることで歩留まりを漸次的に向上させる機能や、新製品開発の効率化に貢献できる機能が求められてきており、重要度と必要性が高まってきている。

このような環境と市場要求から、図3-1に示す様に、半導体製造装置市場全体の伸びに対し、本研究対象の半導体関連のある検査装置市場は著しく成長している<sup>2,3</sup>。半導体製造装置市場に対するこの半導体検査市場の年毎の売上の比を図3-2に示す。2005年から2009年までは0.008%であった売上比が、2011年以降は0.016%と約2倍になっており、ここからも半導体検査装置の重要度と必要性が高まっていることが裏付けられる。

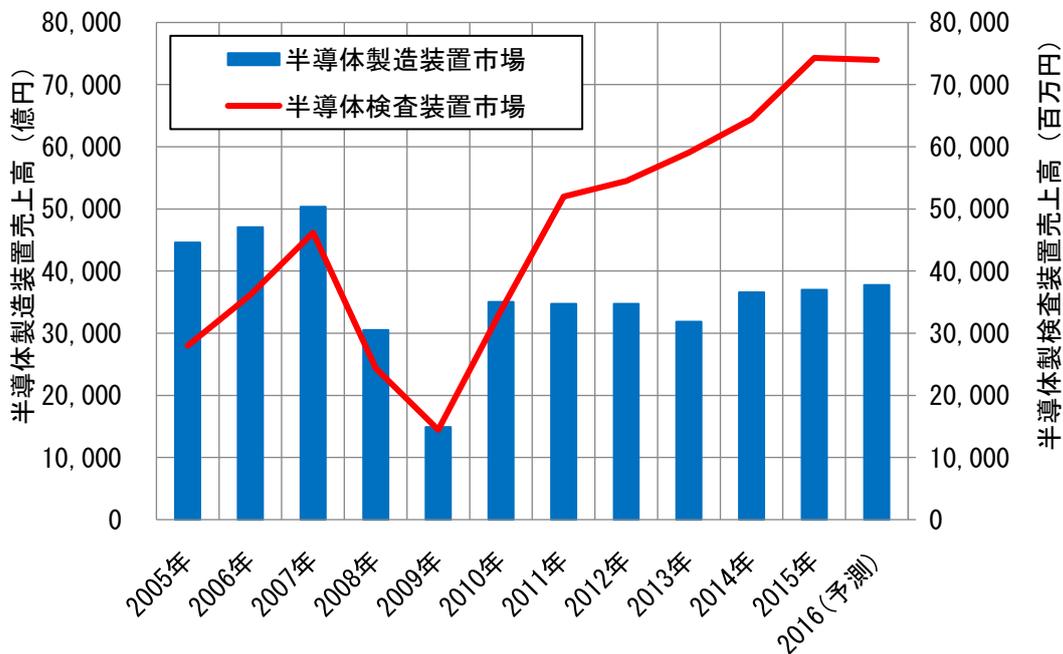


図3-1 半導体製造装置と半導体検査装置の世界市場規模の推移

出所：世界半導体製造装置・試験/検査装置市場年鑑

2005年, 2008年, 2011年, 2014年, 2016年を元に筆者作成

以上から、一つの切り口として半導体検査装置市場調査情報を調査・分析したところ、これまで見て来なかった市場や各顧客の様々な傾向が見えてきた。さらに顧客のアン્યアルレポートを読み、セールスマンやエンジニアからの聞き取りをしたところ、各社の特長や経営戦略が見えてきた。今後、開発したレーザー生成プラズマ光源の事業化を効率よく行うためには、半導体検査装置市場の動向と本光源の顧客である各企業の経営戦略を分析し、分析結果に基づいた開発と提案を行い、かつ各顧客の経営戦略を考慮した事業戦略を立案していくことは、本事業開発において、非常に重要と考える。

そこで本章では、2節で戦略を定義し、この経営戦略の分析と事業戦略の立案をするために戦略に関する先行研究を概観する。3節では半導体検査装置市場の動向をまとめる。4節では、それに基づいた市場各社の戦略分析を行う。5節ではそれらを元にしたレーザー生成プラズマ光源の製品戦略・事業戦略を立案し、6節にて実行された M&A 戦略について確認する。そして、最後に7節で本章をまとめる。

尚、本研究に関して、本稿では具体的な用途・製品名・企業名などは伏せるものとする。

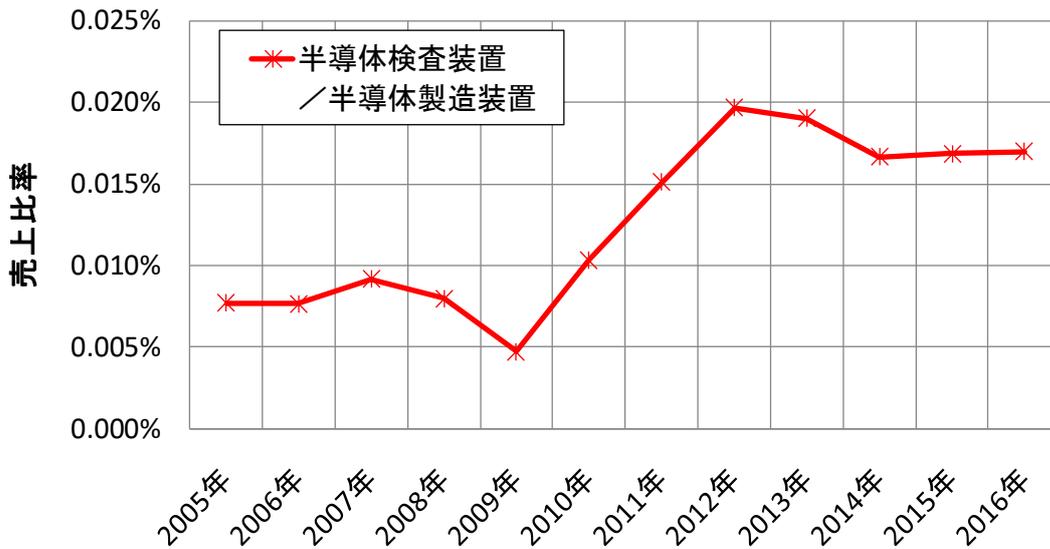


図 3-2 半導体製造装置に対する半導体検査装置の売上比率の推移

出所：世界半導体製造装置・試験/検査装置市場年鑑

2005年, 2008年, 2011年, 2014年, 2016年を元に筆者作成

## 3.2. 戦略に関する先行研究

### 3.2.1. 戦略の定義に関する先行研究

最初に本研究における戦略の概念について定義する。戦略は時代背景や立場などによって様々な定義されてきた。それらを表 3-1 にまとめて示す<sup>6,7</sup>。上段から、Clausewitz, Chandler,

表 3-1 戦略の定義

出所：Barney（2002）、沼上（2009）を元に筆者作成

定義	提唱者	出典
戦争の全体計画、個別の活動方針、およびそれらのかでの個別的具体的行動計画	Von Clausewitz	Barney（2002） 邦訳， p .29
長期的視野に立って企業の目的と目標を決定すること、およびその目的を達成するために必要な行動オプションの採択と資源配分	Chandler	
①組織の基本的ミッション、目的、目標の策定、②それらを達成するための政策と行動計画、③それらの組織目標を達成するために戦略が実行されることを担保する方法論	Steiner and Miner	
組織の目標を達成するための方法	Hatten	
目標や目的（purposes）、長期目標と、それらを達成するための主要な政策と計画のパターンであり、その企業が今現在どのような事業に従事しており、これから従事しようとしているのかということや、今現在どのような種類の企業であり、どのような種類の企業になろうとしているのかを定義するようなやり方でそのパターンが述べられているもの	Andrews などのハーバード大学グループ	沼上（2009） p .24
無数の行動と意思決定のなかに見いだされるパターン	Mintzberg and McHuch	Barney（2002） 邦訳， p .29
コア・コンピタンスを活用し、競争優位を獲得するために設計された、統合かつ調整された複数のコミットメントと行動	Hitt, Ireland and Hoskisson	
いかに競争に成功するか、ということに関して一企業が持つ理論	Barney	

Steiner and Miner, Hatten, Andrews らが提唱した5つの定義では、すべて目標や目的を決定することとその目標や目的を達成するための方法が含まれており、「目標の設定と目標達成のための方法」と要約できる。一方、Mintzberg and McHuch, Hitt, Ireland and Hoskisson

らが提唱した2つの定義の様に、事前に意図した目標や目的が達成されない場合でも競争に成功した事例が無数にあり、それらの創発的に発生したものを、戦略と定義する学説もある。

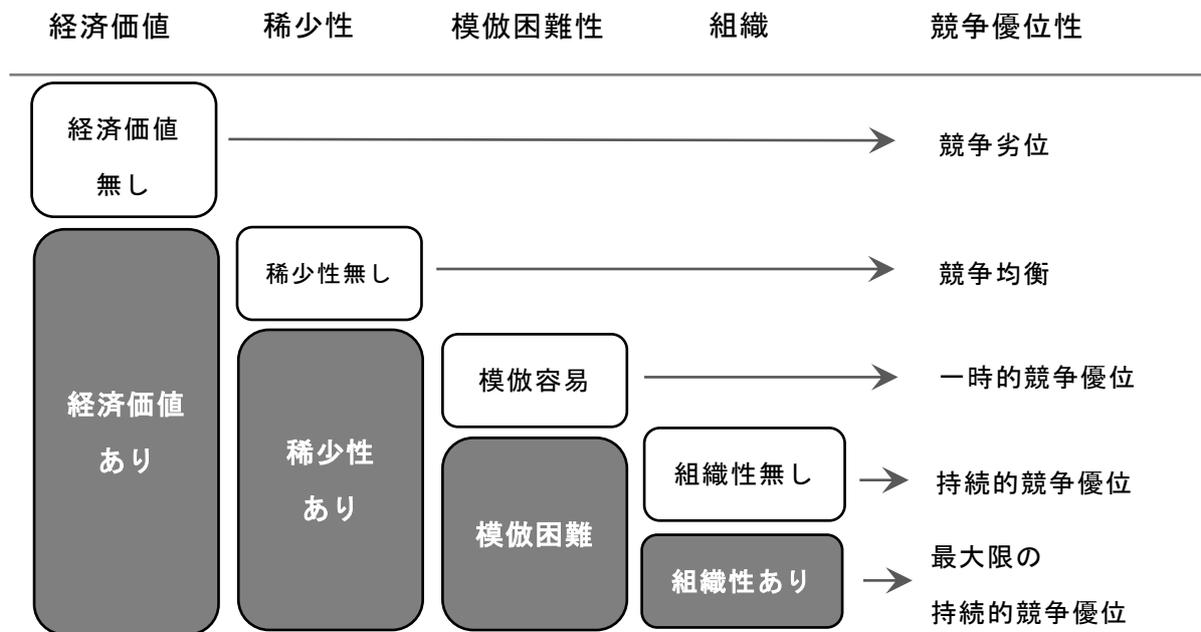


図 3-3 競争優位性の分類

出所：Barney（2002）邦訳を元に筆者作成

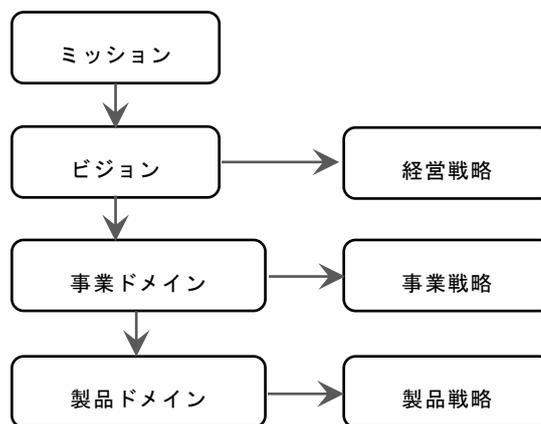


図 3-4 各戦略の位置づけ

出所：Barney（2002）邦訳を元に筆者作成

Barney（2002）はこれらの学説をまとめて、「いかに競争に成功するか、ということに関して一企業が持つ理論」と定義しており、これがそれぞれの学説の主張を最も包括的に要約していると考えられる。ここでの「競争に成功する」とは、企業の活動によって、競争均衡

であれば競争優位に、競争劣位であれば競争均衡以上になることである（図 3-3）。

- ・競争優位：自社が経済価値を創出し、かつ市場において自社が独占しているが状態
- ・競争均衡：自社が経済価値を創出し、かつ複数の企業が競合している状態
- ・競争劣位：経済価値を創出できていない状態

### 3.2.2. 経営戦略の概観

経営戦略の考え方を、Mintzberg（1998）<sup>8</sup>は『戦略サファリ』において10学派に分類して議論している。この10学派は、デザイン・スクール、プランニング・スクール、ポジショニング・スクール、アントレプレナー・スクール、コグニティブ・スクール、ラーニング・スクール、パワー・スクール、カルチャー・スクール、エンバイロメント・スクール、コンフィギュレーション・スクールである。経営戦略論の各学説を正確に描くためにはこの分類に従うことが一つの方法であるが、本研究における戦略分析結果をより良く分類できる沼上（2009）による戦略計画・創発・ポジショニング・経営資源・ゲームの5つの考え方による分類方法を採用し、これに従って経営戦略について概観する。その上で、沼上（2009）によるこれら5つの戦略の相対的な関係を概観する。

#### 3.2.2.1. 戦略計画

経営戦略学派の主要な論者である Ansoff（1965）<sup>9</sup>は主著『企業戦略論』において、企業が保有する資源を転換して利潤を得るプロセスに着目して、企業活動と外部環境の関係を戦略的意思決定（Strategic decision）、企業活動の効率を最大化する意思決定を業務的意思決定（Operating decision）と位置づけた。その上で、「戦略的意思決定は、基本的には企業の内部問題よりもむしろ外部問題に関係があり、具体的にいえば、その企業が生産しようとする製品ミックスと、販売しようとする市場との選択に関するものである。工業用語を使っていえば、戦略的な問題というのは、企業とその環境との間に“インピーダンス・マッチ（impedance match）”をつくりあげるためのものである」（邦訳, p.7）と説明している。

そして戦略的意思決定に際して重要な構成要素として、製品—市場ポートフォリオ、成長ベクトル、競争上の利点、シナジー効果の4つを挙げている。

製品—市場ポートフォリオは、企業が経済活動を行っている市場の範囲を示しており、これを明確にすることによって、自社製品と市場ニーズから進出すべき分野が明らかになる。その上で自社製品の成長の方向性を示したものが成長ベクトルである。

成長ベクトルは、図 3-5 に示す製品（技術）と市場ニーズ（ミッション）を軸にした2次元の表で表わされ、この2つを新規と既存に分けることで、成長の方向を4つに分類す

る。4つの成長ベクトルはそれぞれ、現在の市場に対して既存製品でさらに売上を高めるのが「市場浸透」、現在の市場に対して新製品を投入することで売上を高めるのは「製品開発」、既存製品によって新規市場を開拓するのが「市場開拓」、新規市場に対して新製品を投入することで売上を高めるのが「多角化」、と位置づけられる。

競争上の利点は、事業と成長ベクトルの範囲において、市場や他社に対する自社の優位性を見出すことである。優位性は、競争相手に対するコスト優位と差別化優位の2つに大きく分類される。企業はこの優位性をより長く持続させるために、競争相手に対する模倣障壁を高める必要がある。

		製品	
		既存	新規
市場(ニース)	既存	Market Penetration 市場浸透	Product Development 製品開発
	新規	Market Development 市場開拓	Diversification 多角化

図 3-5 Ansoff (1965) の成長ベクトルの構成要素<sup>10</sup>

出所：庭本 (2012) p. 42. より、筆者が一部修正して引用

シナジー効果は、内部資源と市場の間に生まれる相乗効果であり、Ansoff (1965) は新しい分野に進出した際に製品と市場の間の関連性から得られる相乗効果を、販売シナジー、生産シナジー、投資シナジー、経営管理シナジーの4つに分類した。

この様に、企業が戦略を決定するまでには、製品—市場ポートフォリオによって事業の分野と範囲を決定し、製品とその事業範囲の比較から成長の方向性を決定し、事業分野における自社製品のポジションから競争上の利点を見出し、さらに新市場に参入するには企業全体のシナジー効果が検討されるという4つの過程の必要性が示されている。戦略計画が生まれた背景には、1960年代のアメリカにおける大規模な企業組織が複雑な外部環境に対応するために事前に情報を収集分析し、経営層が中心になって体系的な戦略を立案する必要性があった。

### 3.2.2.2. 創発的戦略

Ansoff(1965)が考えたような制度化された戦略計画は、経営層や本社戦略スタッフが主体となって構築され、トップダウンで施行されるものであると規定されていた。しかし、Mintzberg (1998) は、当初実行しようとした計画が実際にはその通りに実行されず、別の形に変えて実行されて成功している事例から、戦略計画に対して異を唱えた。このようなミドルマネジメントが日常業務の中で環境適応することでビジネスを拡大していくプロセスの結果として創発するパターンを戦略と定義することから、この戦略を「創発的戦略」と呼ぶ。これを図 3-6 に模式的に示す。

戦略計画においては、トップマネジメントのコントロールによる戦略の推進が重視されるが、創発的戦略においては、ミドルマネジメントによる学習が強調される。創発的戦略とは、戦略の実行の最中の時間の経過とともにパターンとして出現する戦略を指し、事前に意図された戦略からミドルマネジメントによって適切に修正しながら実行されるものである。このプロセスは、外部環境に直接晒されている現場メンバーが、試行錯誤しながら進めることから、学習が重要視されている。

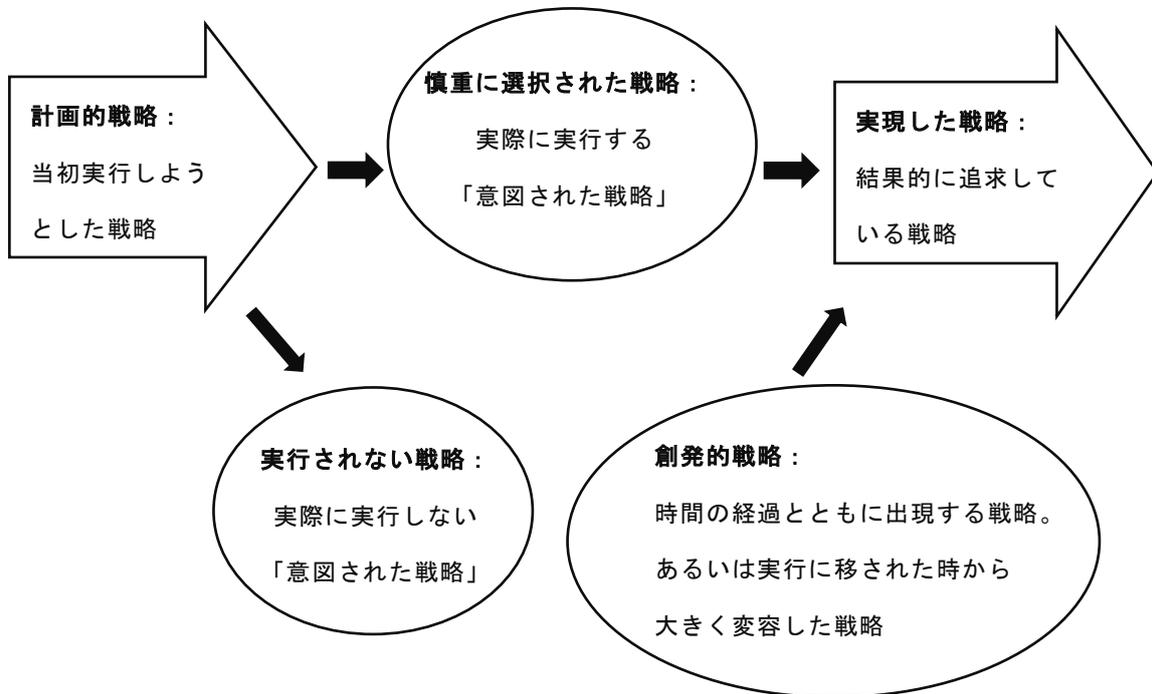


図 3-6 計画的戦略、創発的戦略、実現した戦略の関係

出所：Barney (2002) 邦訳, p44 より、筆者が一部修正して引用

しかし、創発的戦略にも計画的戦略は必要である。創発的戦略においては、経営層が大局的な成長の方向性としての戦略を仮説として打ち出し、それを現場においてミドルマネジメントが戦略として実行する中で仮説検証を行い、仮説と検証結果のギャップから新しい戦略を生み出していく。さらに、この戦略が経営層にフィードバックされ、組織全体としての学習が進む。以上のことから、Mintzberg (1998) の、「戦略とは計画的に策定される、と同時に創発的に形成されなければならない」(邦訳, p.13) という言葉の通り、計画的戦略と創発的戦略のバランスが重要である。

### 3.2.2.3. ポジショニング・ビュー

これまで戦略計画と創発的戦略では、主に社内の戦略立案を経営層とミドルマネジメントという軸を中心に議論してきた。それに対し、次に外部環境における事業の機会と脅威と、内部環境における強みと弱み（経営資源）を中心に議論していく。

外部環境における事業の機会と脅威を中心とした経営戦略の思考法をポジショニング・ビューという。ポジショニング・ビューは、自社製品や事業の「ポジション」をどこに置くに着目した考え方であり、ポジションには空間的な立地だけでなく、人の中に占める心理的な立地、競争市場・取引関係などにおける立場・地位なども含まれる。そして、どこにポジションを置くと利益が出やすいかを基本に置いて戦略を組み立てる思考法である。

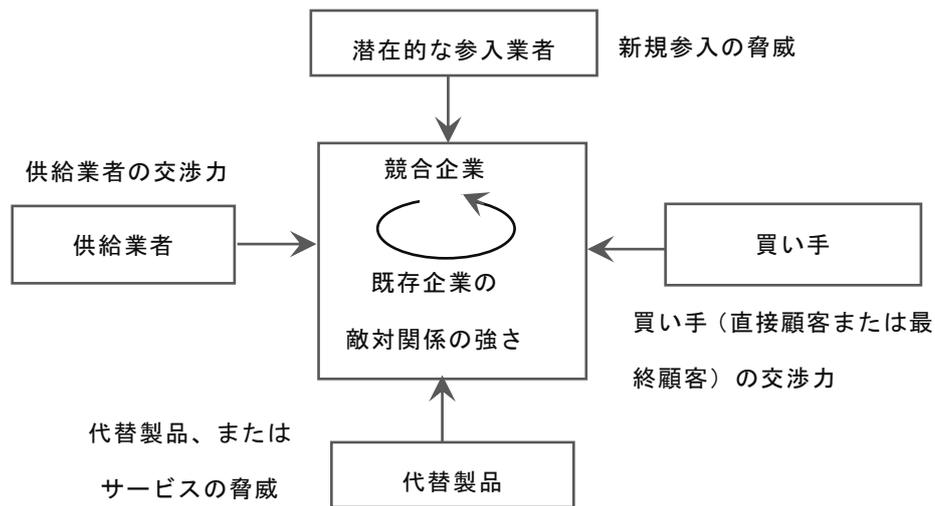


図 3-7 業界の背有益性を決める 5つの競争要因

出所：沼上 (2009) p.59 より、筆者が一部修正して引用

この代表的な考えが、図 3-7 に示す Porter (1980) <sup>11</sup> のファイブ・フォース・モデルである。ファイブ・フォース・モデルは、利益ポテンシャルを左右する諸力が、①既存企業間の対抗度、②新規参入の脅威、③買い手の交渉力、④売り手の交渉力、⑤代替品の脅威、の5つに分類される。(参考：沼上, 2009, p.58) これら5つの競争要因が厳しくなればなるほど利益ポテンシャルは低下し、逆に有利に立つことができれば利益ポテンシャルは高まる。但し、注意する点として、このファイブ・フォース・モデルは成熟産業の分析には適しているが、成長産業には適していない。なぜなら、成熟産業では業界構造が固定化されているため、競合との力関係や買い手・売り手の交渉力などが分析可能であるが、成長産業においては業界構造がまだ安定しておらず、これらの諸力の関係を正しく分析できない。従って、この分析手法は流動的な成長期にある業界ではなく、業界の集中度などがある程度固定化された成熟期にある業界に対して、高い分析力を発揮する思考法である。

#### 3.2.2.4. 経営資源 (リソース・ベースド・ビュー)

内部環境における強みと弱み (経営資源) を中心とした経営戦略の思考法をリソース・ベースド・ビューという。リソース・ベースド・ビューは、企業が持つ目に見えないコア・コンピタンスを武器として、長期にわたって競争優位を維持し、利益を上げていくための思考法である。この思考法を図 3-8 に模式的に示す。図中の時間軸  $t$  に従い、コア・コンピタンスに基づいて製品群 A,B,C を順次開発したとする。それらの製品群が個々に成長し、衰退した後も維持していた場合、コア・コンピタンスは維持され、その後のブレイクスルー製品群 D を生み出すことが可能となる。しかし、もし衰退した製品群 A,B,C を捨て去った場合、創出できる事業機会が魅力的であるのに、事業を捨ててしまうとコア・コンピタンスも失い、ブレイクスルー製品群 D を生み出すことが出来なくなる。

ポジショニング・ビューでは、現在の製品一市場ポートフォリオを元に戦略を立案するため、「現在目に見える」製品や事業には高い分析力を発揮する。しかし、「現在目に見えない」長期的な利益や流動的な成長期にある業界を分析する際には限界がある。もし、ポジショニング・ビューのみに頼って戦略を立案した場合、衰退している製品や業界から撤退すれば、一時的には高い利益率を得られる可能性は高い。しかし、そのような経営戦略を継続していると、これまでそれらの事業を背後で支えてきた技術力やマーケティング力、オペレーション力のノウハウなどは消失する。もし、それらの「目に見えない」コア・コンピタンスが残っていれば、それを基礎にして新しい事業を開拓できるかもしれない。その部分に注目したのがリソース・ベースド・ビューの思考法である。

もし、自社の持つコア・コンピタンスを他社が簡単に真似できてしまうならば、そのコ

コア・コンピタンスの市場における高い価値は一時的なものに過ぎない。一方で、自社のコア・コンピタンスの模倣や再現の難易度が高いほど、市場における高い価値の維持が可能になる。

Barney (2002) は、一般的に適用可能なリソース・ベースド・ビューのフレームワークを構築した。このフレームワークは、VRIO フレームワークと呼ばれ、経済価値 (value)、希少性 (rarity)、模倣困難性 (imitability)、組織 (organization) に関する4つの問いから構成されている。これら4つの問いに答えることによって、自社のコア・コンピタンスが強みなのか弱みなのかを判断できる。しかし、このフレームワークも、外部環境の激変(シュンペーター的変革)を考慮できないことなどの課題を抱えている。また、リソース・ベースド・ビューだけでは、撤退すべき事業からの撤退を躊躇させ、儲からない事業への多角化を正当化するという危険性も孕んでいる。これらの点から、計画的戦略と創発的戦略のバランスが重要であると同様に、ポジショニング・ビューとリソース・ベースド・ビューのバランスが重要である。

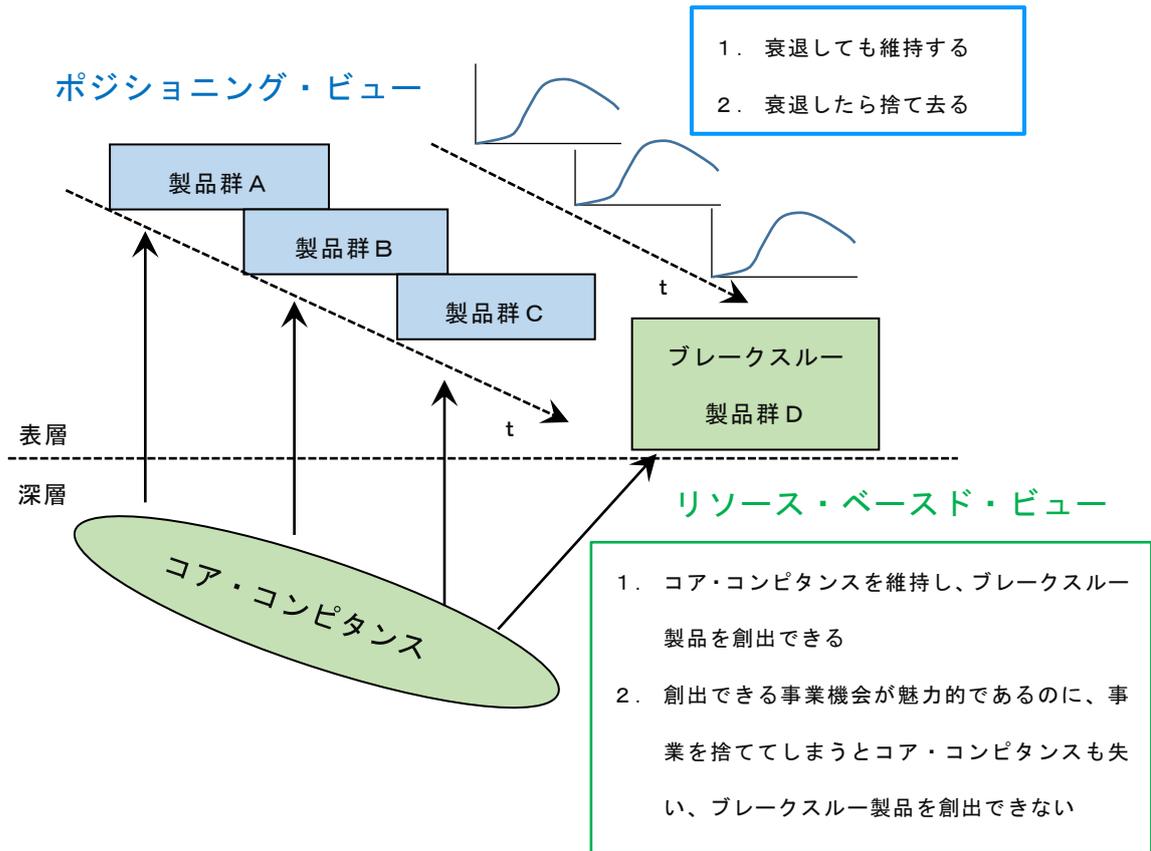


図 3-8 ポジショニング・ビューとリソース・ベースド・ビューの違い

出所：沼上, 2009, p.78 より、筆者が一部修正して引用

3.2.2.5. ゲーム

ゲーム論的アプローチは、競争相手や取引先の意図を読みながら、その後の相互作用が展開されていくシナリオを予想するという思考法である。そのため、相互作用を解読することに力点が置かれ、ダイナミックな相互作用の解読が特徴である。企業の相互作用には常に競争と協調の両面が存在するため、相手との相互作用を解読することで、自社のみが競争優位に立つだけでなく、敵対関係にある企業間でも協調が可能となるケースもある。

しかし、一般によく知られている「囚人のジレンマ」の様な、プレイヤーが二者しかおらず、シンプルで短いゲームを元にしたアプローチだけでは、長期的な構想という面が弱くなり、局所的な戦術に陥る傾向にある。そのため、ゲーム論的アプローチで長期的な構想を検討する際には、複数の立場のプレイヤーと複雑で長い相互作用を視野に入れる必要がある。

次に、ゲーム論的アプローチの一つであるシステム思考についても俯瞰する。システム思考は、多様な視点からシステム全体を観察し、それぞれの要素に影響を与える構造とその相互作用を理解することで、システム全体の最適化を検討するためのアプローチである<sup>12,13</sup>。目に見える課題だけを近視眼的に理解するのではなく、課題を含んだシステム全体を多くの要素の相互作用の結果として理解し、その根本的な原因を見極め、直面している課題以外の要素に長期的にも悪影響を及ぼさない最も効率的で効果的な課題解決方法を考える思考法である。このシステム思考は、GE・デュポン・GMなどに大きな戦略的成功と利益向上をもたらした。

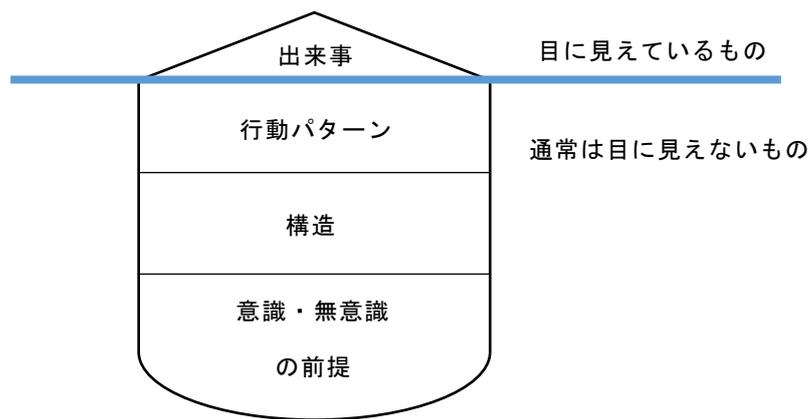


図 3-9 氷山モデル

出所：枝廣・内藤（2007）p.74 より、筆者が一部修正して引用

システム思考のアプローチとして有名なのが、図 3-9 に示すも冰山モデルで表される「時系列パターングラフ」である<sup>14</sup>。目に見えている出来事を生んでいるのは、その出来事の奥に潜む目に見えにくい変化や行動の「パターン」であり、そのパターンを作り出している「構造」であり、さらにその構造を創り出している関係者たちの意識・無意識の前提としての「メンタルモデル」である。そこで、出来事を時間の経過に伴うパターンとしてとらえ、そのパターンを引き起こすシステムの構造を明らかにして、構造そのものを変えることができれば、現状とは別の望ましいパターンや出来事を実現することができる。

### 3.2.2.6. 各戦略の相対的な関係

ここまで経営戦略を戦略計画・創発・ポジショニング・経営資源・ゲームの5つの考え方による分類に従って概観してきた。その結果、戦略を立案するためには、計画的戦略と創発的戦略のペアと、ポジショニング・ビューとリソース・ベースド・ビューのペアという2つの軸を状況に応じてバランスすることと、ゲーム論的アプローチによって、システム全体を理解することが重要であることを確認した。

沼上（2009）は、これら5つの経営戦略観を3つの軸に分けて相対的な関係を図に表している。縦軸に社内の立場と時間を取り、上側をトップダウン（事前の合理的計画）下側をボトムアップ（事後の創発重視）とし、上側に戦略計画を下側に創発戦略を置く。横軸には経営戦略を策定する際に重視する軸足あるいは発想の起点を取り、右側を環境の機会と脅威、左側を経営資源とし、右上側にポジショニング・ビューを、左下側にリソース・ベースド・ビューを置く。奥行き軸には、奥側を安定的構造志向とし、手前側を時間展開・相互作用・ダイナミクス志向とし、右側全体に立体的にゲーム論的アプローチを置いている。これら5つの経営戦略観やその技術を、自社のその時の状況や目的に合わせて複眼的に相互補完させながら用いていくことが適切な経営戦略の思考法である。

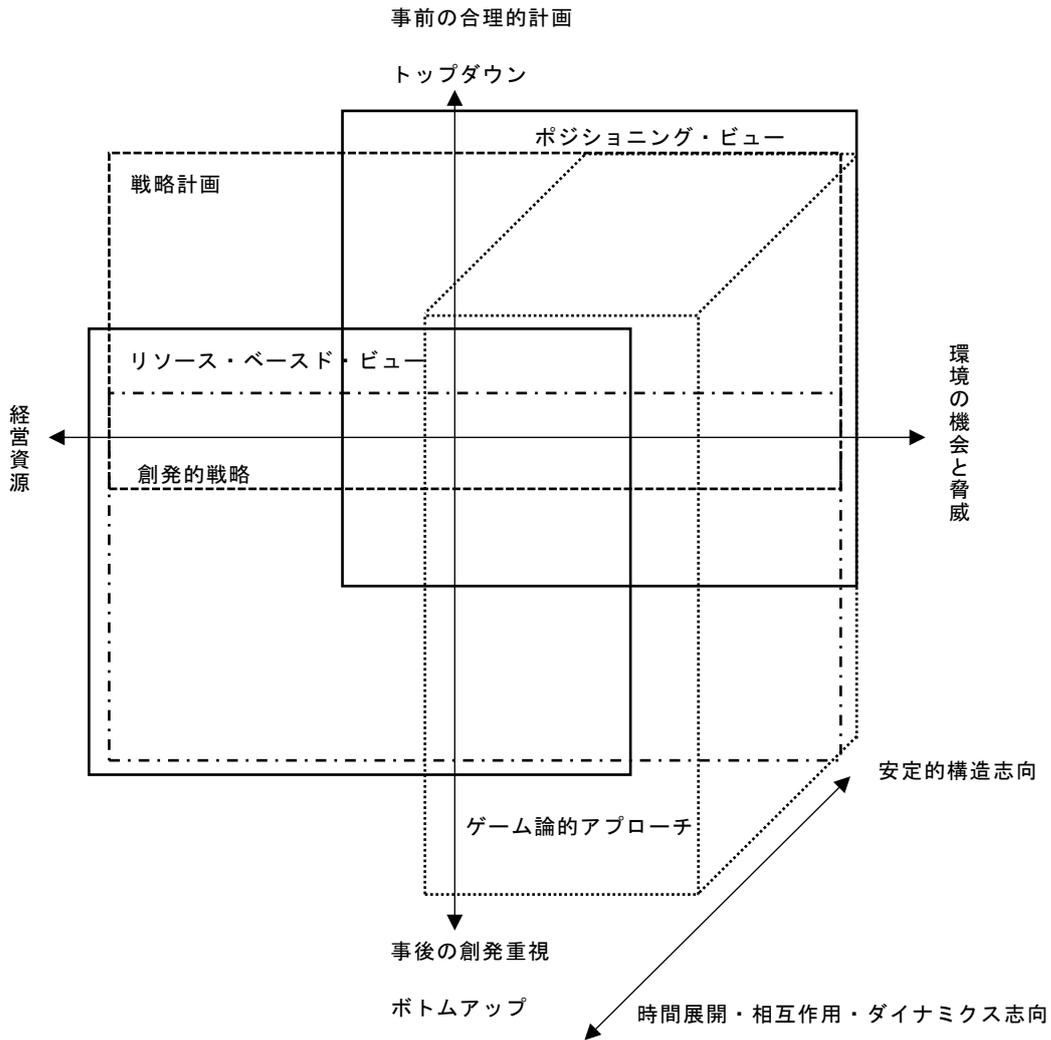


図 3-10 経営戦略観の相対位置

出所：沼上, 2009, p.122 より筆者が一部修正して引用

### 3.2.3. 戦略の定義と先行研究のまとめ

3.2.1 項において、Barney (2002) による、「いかに競争に成功するか、ということに関して一企業が持つ理論」との戦略の定義を紹介し、これがそれぞれの学説の主張を最も包括的に要約していると考えたと判断した。しかし、X 社においては「一企業が持つ理論」と言えるだけの理論は今のところ構築されていない。逆に筆者が本研究の開始以前に経験した複数の製品開発の実践を踏まえると、事前の戦略計画に従って進行するよりは実践の中で個別の戦略が創られるという Mintzberg (1998) の指摘に合致するケースが多い。また、経営分析を行った顧客企業については、外部観察者による分析しか行えなかったため、戦略が計画的か創発的かまでは識別できない。そこで、概観した先行研究、X 社における実

践、ならびに外部観察者は戦略の計画性と創発性を識別できないことの3つを踏まえた上で、本研究における戦略を、「いかに競争に成功するか、ということに関して、戦略計画が実践の中で構築されるもの」と定義する。

5つの経営戦略観と沼上による各経営戦略観の相対的な関係を概観した結果、企業におけるそれぞれの意思決定者がミッションに応じて、複眼的に各経営戦略やその技術を用いることが重要であることが分かった。また、顧客や競合企業の戦略を分析する際にも、これらの戦略観を複眼的に持つことによって、より実情に近い分析が可能となる。

次節以降において、顧客企業の経営戦略分析を行う際には、内部観察者が存在しないため、外部観察者による情報収集の結果のみによって戦略を分析する。この場合、戦略が計画に基づくものか、創発的なものかを識別することはできない。しかし、ポジショニング・ビューとリソース・ベースド・ビューの視点から分析した事例は複数ある。そのため、顧客企業の戦略分析は、ポジショニング・ビューとリソース・ベースド・ビューの視点から分析を行う。また、競合企業の戦略分析については、未公開企業であるため得られる情報が少なく、外部観察者による情報・分析だけでは非常に困難であり、行わないこととする。

### 3.3. 市場の動向と分析

#### 3.3.1. 調査方法

2005年～2016年の範囲で、市場調査資料、関連企業のアニュアルレポート、ニュースリリース、業界誌、新聞などのオープンデータを用いて、統計的に分析した。また、各社の販売状況や経営戦略について、各種チャネルを通じた聞き取り調査を行った。また、筆者は半導体検査装置に関連する部材の技術営業と研究開発の経験を有しており、この知識と経験も踏まえて調査した。

#### 3.3.2. 売上高、シェアの調査結果

各社と市場全体の売上高の推移を図3-11に、そのシェアの推移を図3-12に示す<sup>5</sup>。2005年には300億円程度の売上高であったが、2015年には700億円以上にまで急成長している市場である。シェアについては海外の3社で70～90%を占めており、1位と2位以下のシェアに2倍以上の格差がある。これは、小林（1968）に従うと、非同質的寡占市場で、高位型及び高度寡占型の市場に分類される<sup>15</sup>。

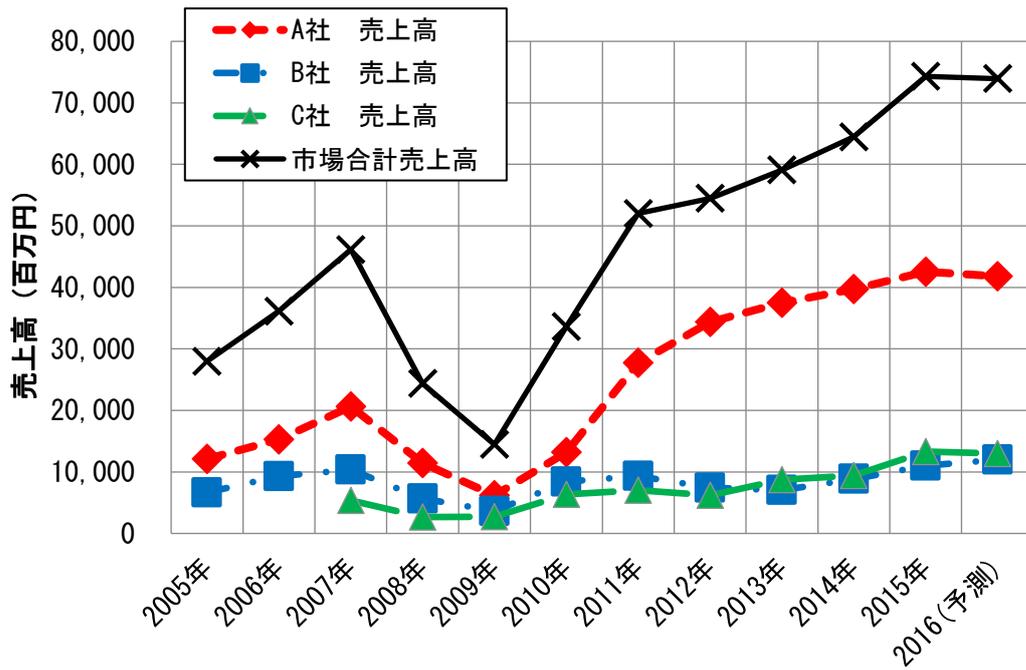


図 3-11 各社の半導体検査装置の売上高の推移

出所：世界半導体製造装置・試験/検査装置市場年鑑<sup>5</sup>

2005年, 2008年, 2011年, 2014年, 2016年を元に筆者作成

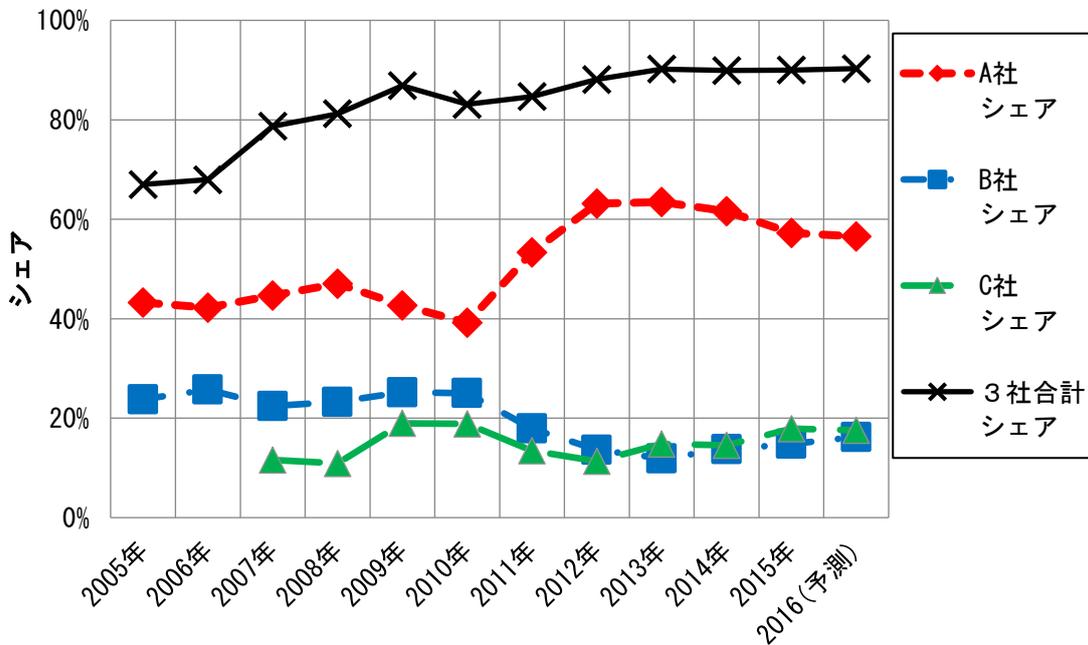


図 3-12 各社の半導体検査装置の世界シェアの推移

出所：世界半導体製造装置・試験/検査装置市場年鑑<sup>5</sup>

2005年, 2008年, 2011年, 2014年, 2016年を元に筆者作成

その3社のうち、トップメーカーA社は、2010年までは約40%のシェアで安定していたが、リーマンショック後、2011年から急激に60%までシェアを伸ばしている。それに対し、B社のシェアは2010年までは横ばいだが、2011年からは低下傾向にある。C社のシェアは、継続してほぼ横ばいであるが、結果的にB社とほぼ同じになっている。

### 3.3.3. 対象企業の比較

各社の2012年～2016年の経営状況を表3-2に示す<sup>16,17,18</sup>。A社は他の2社の10倍以上の売上高がある。これは、他の2社が手掛けていない本研究対象以外の装置も商品展開しており、それらの市場で高い売上高を上げているためである。営業利益率は20%を常に上回っており、非常に高い。研究開発費は年間およそ5億ドル（売上比15～18%）と突出して多く、研究開発に非常に積極的な姿勢が見える。一方、B社は、2013年と2014年の2期連続で営業利益が赤字であり、非常に苦しい経営状態にある。その中でも研究開発費に売上比20%前後を常に割いている。C社は、売上は3位であるが、年々売上を伸ばしており、2位のB社に肉薄してきている。営業利益率は11～14%と比較的高いことから、効率の良い経営であることが分かる。研究開発費も売上比24～27%と、比率のみなら最も高く、研究開発に非常に積極的な姿勢が見える。

これらのデータから、3社の営業利益率に大きな差があること、半導体検査装置メーカーにおいては非常に高い研究開発費の比率が必須であることが読み取れる。

表3-2 各社の経営状況

出所：各社アニュアルレポート<sup>16,17,18</sup>を元に筆者作成

企業名 年度	A社					B社					C社				
	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年
売上高 (百万ドル)	2,843	3,172	2,929	2,814	2,984	183	144	166	187	221	96	112	121	149	164
前年度 比		12%	-8%	-4%	6%		-21%	16%	12%	18%		17%	8%	24%	10%
営業利益 (百万ドル)	1,016	730	734	434	858	6	-22	-12	5	29	11	12	17	12	11
営業利益 率	36%	23%	25%	15%	29%	3%	-15%	-7%	3%	13%	11%	11%	14%	8%	7%
研究開発費 (百万ドル)	451	485	539	530	481	30	33	34	33	31	25	30	29	40	35
研究開発費 率	16%	15%	18%	19%	16%	16%	23%	20%	18%	14%	26%	27%	24%	27%	21%

### 3.3.4. 製品ラインナップと新製品投入数の比較

各社のアニュアルレポートから抽出した、その年に投入した本研究対象に関連する新製品・新サービスの数の推移を図3-13に示す<sup>16,17,18</sup>。

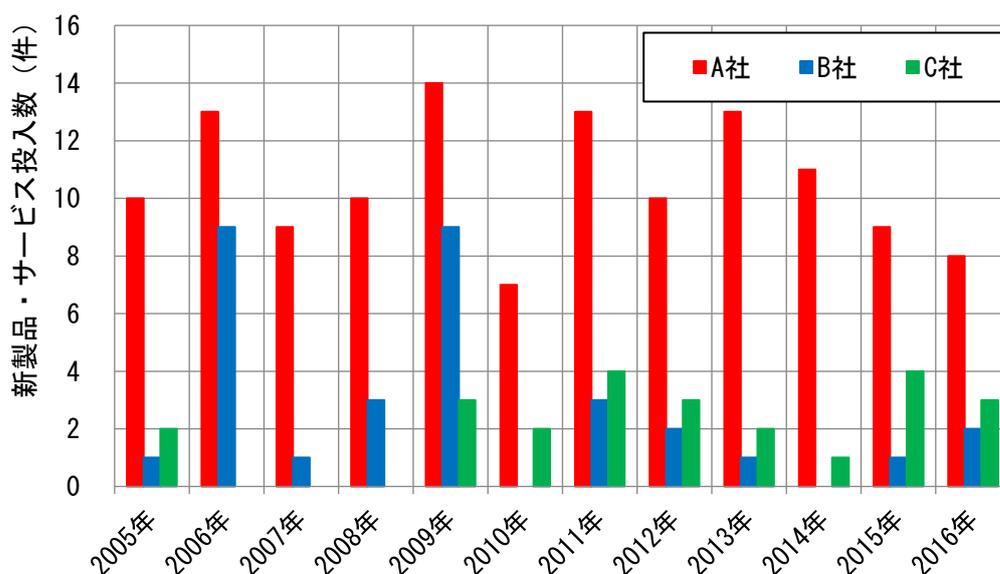


図 3-13 各社の半導体検査関連の新製品・サービス投入数の推移

出所：各社アニュアルレポート<sup>16,17,18</sup>を元に筆者作成

A社は、製品ラインナップも圧倒的に多く、この10年間に7件以上、毎年コンスタントに新製品や新サービスを投入している。リーマンショック直後の2009年以降にも安定して新製品を投入していることから、景気や業績の悪化時にも積極的に商品展開していることが読み取れる。

B社は、2009年までは積極的に新製品を投入していたが、その後は新製品・サービス投入数を減らしている。C社は、A社に比べ製品ラインナップは少ないが、コンスタントに新製品を投入している。特に、リーマンショック後にその数を徐々に増やしてきており、これがB社の売上に迫ってきた一因であると推測する。

### 3.3.5. 企業吸収合併・買収数の比較

各社の企業合併・買収数の推移を図3-14に示す<sup>16,17,18</sup>。A社は、2005年からの12年間に10社を吸収合併・買収している。さらに2009年、当時半導体製造装置市場において世界3位であり、かつその後も成長が見込まれていたメーカーD社との業務提携を開始し、新製品と新サービスを共同開発した<sup>16,19</sup>。32nmノード以降の検査装置への性能要求を満たすこの新しい製品・サービスは、それぞれの業界のリーディングカンパニーであるA社とD社の強みを生かして共同開発されたものであり、生産性の向上だけではなく、ユーザーが次世代デバイスを開発・製造することに大きく貢献するものであった。

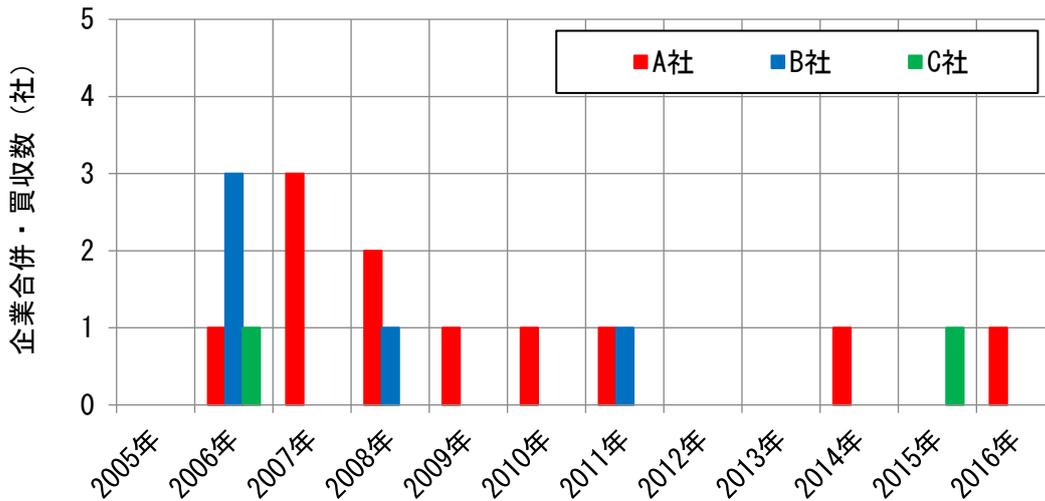


図 3-14 企業合併・買収数の推移

出所：各社アニュアルレポート<sup>16,17,18</sup>を元に筆者作成

これは、半導体検査装置メーカーが半導体製造装置メーカーと技術協力することによって、検査結果や歩留まり管理結果をそのまま生産ラインにフィードバックして、生産条件の改善や、新しいデバイスの開発時の条件出しが一貫してできるようになったことを意味している。これにより、歩留まり改善が効率的にできるだけでなく、デバイスの開発スピードも向上させられるようになるため、ユーザーのメリットが非常に大きい。A社は、このメリットをいち早く予見して、リーマンショックによる景気の後退と売上の急激な落ち込みの中にあっても、半導体製造装置大手企業との共同研究や業務提携をアグレッシブに行っている姿勢が見て取れる。

B社は、2005年からの12年間に5社を吸収合併・買収している。しかし、半導体製造装置メーカーとの提携などの具体的な協働は見られない。C社の吸収合併は同期間内に2社のみである。しかし2008年、C社は当時半導体製造装置市場における世界6位のメーカーE社の子会社F社と業務提携し、F社製装置にC社製検査装置が標準搭載される様になった<sup>18,20</sup>。これにより、C社の売上は安定的になった。

### 3.3.6. 研究開発の結果の比較

3社の世界各国への特許出願数を比較することで、研究開発の結果のアウトプットを評価する。図3-15の特許数の推移のグラフは、Thomson Innovationに収録されているすべての出願特許から、出願人に各社名が入っているものを抽出して、年度ごとに件数をカウントして作成したものである。2016年は、まだ公開されていない特許があるため、出願数が

少なくカウントされている。研究開発費は、各社のアニュアルレポートから抽出した<sup>16,17,18</sup>。

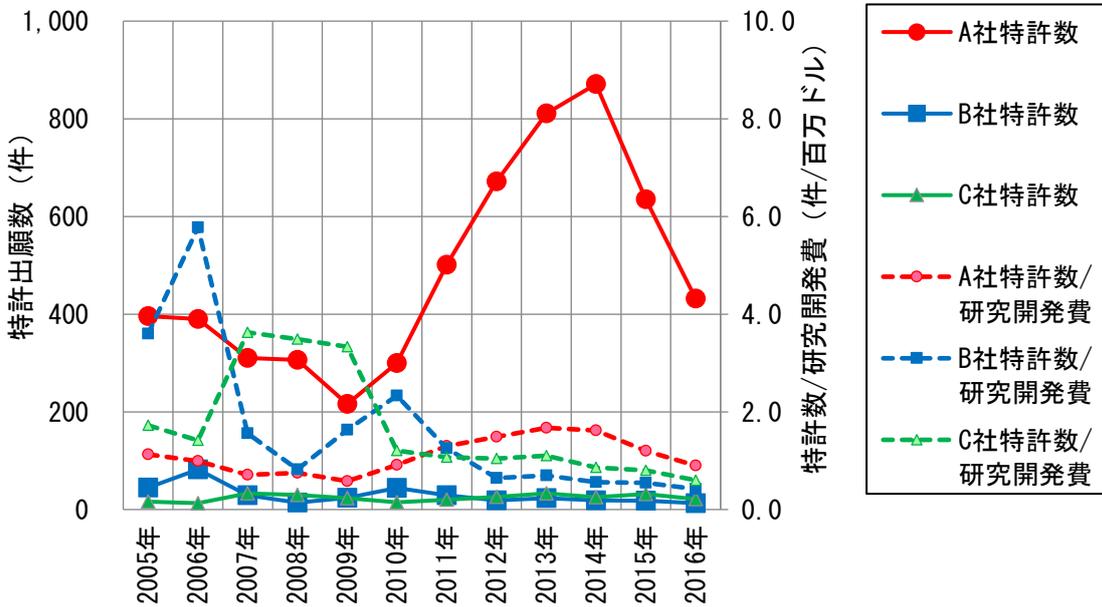


図 3-15 各社の特許出願数と研究開発費の推移

出所：各社アニュアルレポート<sup>16,17,18</sup>と

Thomson Innovation による調査結果を元に筆者作成

A社は、リーマンショック時に落ち込みはあるものの、その後は売上増加に伴って急激に特許出願数を増やしている。また、研究開発費当たりの出願特許件数が、百万ドル当たり1件程度で安定しており、研究開発の成果が安定してアウトプットされていることが分かる。それに対してB社とC社の特許出願件数は、横ばいからやや低下傾向にあり、研究開発費当たりの特許出願件数は急速に低下している。

### 3.3.7. サポート体制の比較

各社のアメリカ、ヨーロッパ、アジア太平洋地域のサポート拠点としての支社の数を、表3-3に示す<sup>16,17,18</sup>。半導体関連装置市場で勝ち抜くためには、高いレベルの顧客サポート体制が必須である。これは、ユーザーが生産ラインの稼働率を少しでも高めたいという要求と、より短期間でより質の高い新製品を開発したいという要求に応えるものである。

半導体検査装置メーカーA社・B社・C社の3社とも、アメリカ、ヨーロッパ、アジア太平洋地域の世界各地にサポート拠点を整備している。これにより、カスタマーサポートエンジニアを通じてレスポンスの高い現地サポート体制を実現し、迅速に顧客の細やかな

ニーズに応えようとしている点は共通している。その中でも A 社は、最大規模のサポート体制を持ち、展開国数も多い。

表 3-3 各社のサポート拠点のある国数

出所：各社アニュアルレポート<sup>16,17,18</sup>を元に筆者作成

	(国数)		
	A社	B社	C社
アメリカ	1	1	1
ヨーロッパ	8	2	2
アジア	5	6	5
計	14	9	8

### 3.3.8. 半導体検査装置市場の分析

ここで、ここまで調査してきた半導体検査装置市場における競争環境を理解するために、Porter（1980）が『競争の戦略』で提唱したファイブフォース分析を用いて A 社・B 社・C 社の競争環境を分析する<sup>11</sup>。ファイブフォース分析とは、供給企業の交渉力・買い手の交渉力・競争企業間の敵対関係という 3 つの内的要因と、新規参入業者の脅威・代替品の脅威の 2 つの外的要因の、合計 5 つの要因から業界全体の構造や収益力・魅力度を分析する手法で、複雑な競争環境や脅威などを理解・予測するのに役立つものである。

第一に供給企業の交渉力の視点から分析する。この市場の製品はどれも複雑で多くの部材から構成されている装置であるため、材料などの供給不足や値上がりについて、供給企業の交渉力は脅威とはならない。

第二に買い手の交渉力の視点から分析する。本研究対象の半導体検査装置の顧客は、半導体デバイスメーカー・ファウンダリであり、シリコンサイクルによる景気の影響を非常に受けやすい。シリコンサイクルとは、半導体産業において見られる、約 4 年の周期を持つ景気循環のことである。技術革新のスピードが早い半導体産業では、設備投資や在庫管理のタイミングの調整が難しいとされており、ムーアの法則に基づいた製品の世代交代の時期に、需要と供給のバランスが崩れやすい。半導体デバイスメーカーの業績がシリコンサイクルに大きく影響を受け、それが半導体検査装置メーカーの業績に直接反映しているケースが以前は多かったことから、買い手の脅威の強い市場であると言える。最近では各社が落差を抑える取り組みを様々に行っており、シリコンサイクルの波は小さくなりつつあるが、現在でも半導体デバイスメーカー・ファウンダリの買い手の影響力は変わらず非常に強いままである。

第三に競争企業間の敵対関係の視点から分析する。3-3 節の半導体検査装置市場の動向

調査により、この市場が A 社・B 社・C 社の 3 社による非同質的寡占市場であり、高位型及び高度寡占型の市場にあることが明らかになっている。その中で、トップメーカーの A 社は、市場シェアの約 60%を保有していること、最も多額の研究開発費を投入可能であり、かつそれを投入し続けていること、その成果としての新製品数や特許数も最大であることから、圧倒的に優位な状態を持続している。そのため、従来のビジネスモデルを踏襲しながら着実に進化し、2 番手以降の動きに注視し、動きがあれば模倣するというリスクを最小限に抑える戦略が可能である。この点で、A 社にとって、競争企業の敵対関係は大きな脅威とはなっていない。それに対し、2, 3 番手の B 社・C 社は、トップメーカーや同規模のライバル社との差別化が求められ、それができないとシェアを奪取できない厳しい競争環境にある。この点で、B 社・C 社にとって、競争企業の敵対関係は大きな脅威となる。

第四に新規参入業者の脅威の視点から分析する。本研究対象の半導体検査装置は非常に特殊な技術的蓄積が必要な装置であり、単純な技術開発で新規参入できる市場ではない。また、半導体市場では COPY EXACTLY（コピーグザクトリー）を求められることが多く、新規参入の障壁は非常に高いと言える。この点からも新規参入業者が脅威となる可能性は低いと考える。

最後に代替品の脅威の視点から分析する。脅威となり得る代替品として、他の検査方法の発明や検査自体が不要になるケースが考えられるが、現在のところその様な可能性は見られない。また、半導体デバイスの進化に合わせて検査方法や装置自体は進化を続けており、この点からも代替品が脅威となる可能性は低いと考える。

以上のファイブフォース分析の結果から、A 社にとっては、買い手の脅威が最重要要因であり、この脅威を減らす戦略がこの市場におけるもっとも有効な戦略となる。B 社と C 社にとっては、買い手の脅威に加えて、競争企業間の敵対関係が最重要要因であり、これらの脅威を減らす戦略がこの市場におけるもっとも有効な戦略となる。

### 3.4. プレイヤーの戦略分析

前節で述べた視点を中心に、本節にて各半導体検査装置市場の主なプレイヤーである A 社・B 社・C 社それぞれの戦略を分析する。

#### 3.4.1. A 社の戦略分析

半導体デバイスメーカーなどから半導体製造・検査装置に求められていることは、毎年向上するデバイスの微細化・高集積化に対応しつつ、いかにして不良率を低減し、生産性を高め、スピーディーな新製品の市場投入に貢献できるかということである。それに対応

するため、トップメーカーA社は既存の半導体検査装置メーカーの枠を超えて、半導体製造装置メーカーとの協働、各種先端企業の買収や吸収合併を進め、半導体デバイスの歩留まり管理の専門技術集団としての能力を高めることで、業務のフィールドを拡げつつ、業界での地位を確立してきた。その結果、2015年以降の年間売上高が約4億ドル以上と大きく成長し続けており、半導体製造・検査装置メーカー全体のランキングにおいても、世界第5位の地位を維持している<sup>5,21</sup>。

一般的にトップメーカーは一定の規模になるとイノベーションのジレンマに陥り、市場を失うことが珍しくない。実際に、日本の半導体メーカーはイノベーションのジレンマに陥り、1980年代半ばには世界シェアの50%以上を占めていたにも関わらず、20年も経たないうちに、そのほとんどが壊滅した<sup>22</sup>。それに対し、A社は20年以上に渡ってトップメーカーの座を維持し続け、かつ高い成長率を維持している。このA社の競争力の源泉としての経営戦略は、以下の3つに集約できる。

一つ目は、毎年およそ5億ドル、売上の15%以上を研究開発費として積極的に投資し、それを着実に特許という形で成果にし、次世代の新しい製品やサービスを生み出していくために必要なコア・コンピタンスを強化していることである。これにより、毎年新製品や新サービスを投入でき、かつそれらには常に新しい技術やアイデアを採用していることで、業界を技術的にもリードし続け、さらに特許によって他社に対する技術的な優位性を長期的に維持し続けることが可能となっている。

二つ目は、市場シェアの約60%を保有しているという強みを活かした高い情報収集能力により、顧客ごとに検査項目や検査結果に基づいた製造条件の調整や、生産ラインのカスタマイズが必要になるということをいち早く予見し、それに対応してきたことである。この予見に基づいて、当時世界シェア3位の半導体製造装置メーカーとの業務提携や、各種企業の吸収合併・買収を進めたことで、検査や管理を生産ラインと統合することが可能となった。

現在の複雑な半導体デバイスの生産工程は、製造と検査が複数繰り返されて完成される。そのため、検査結果を、正しく迅速に製造装置にフィードバックすることは、ウェハの歩留まりを向上させたり、開発品の問題点を解明して対策したりする上で、非常に重要なことである。しかし、図3-16の模式図に示す通り、これまで半導体の製造と、検査の装置メーカーが別々であったことから、システムとしての一貫性が不十分で、検査結果のフィードバックを、各ユーザーが、各ユーザーのノウハウを使って行う必要があり、歩留まり改善の足かせとなっていた。

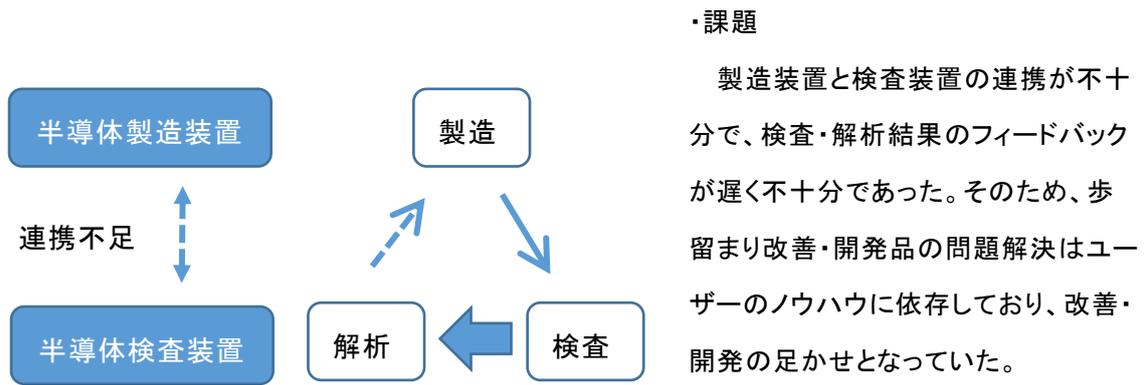


図 3-16 従来の半導体製造と検査・解析のサイクル

・課題

製造装置と検査装置の連携が不十分で、検査・解析結果のフィードバックが遅く不十分であった。そのため、歩留まり改善・開発品の問題解決はユーザーのノウハウに依存しており、改善・開発の足かせとなっていた。

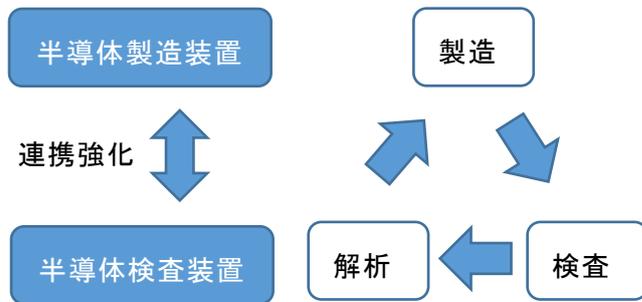


図 3-17 半導体製造装置と半導体検査装置の連携による改善後のサイクル

・結果

製造装置と検査装置が強力に連携することで、検査・解析結果のフィードバックが速く確実にになり、歩留まりと開発を検査装置側でマネジメントできるビジネスに進化した。

その状況に対し、図 3-17 の模式図に示す通り、この業務提携によって、製造装置と検査装置が強力に連携し、最初から一つのシステムの中で稼働するようになった。これにより、検査装置が自ら製造装置にフィードバックを掛けて、迅速に歩留まりの改善や問題点の解明ができるようになった。言い換えると、半導体の生産と開発を、検査装置自体がコンサルティングできる様になったと言える。この点で、A 社は、従来の「半導体ウェハを検査するための装置」を販売するだけのビジネスではなく、検査装置と製造装置を強力に連携させることで、生産工程全体の連携を強化し、歩留まりをマネジメントできるようにビジネスを進化させてきた。その結果として、「半導体製造全体のコンサルティング」までを一つのビジネス（事業分野）として行えるように、戦略的に研究開発と業務提携を実践してきた点が、このトップメーカー A 社の経営戦略の核であると考えられる。これは、検査装置メーカーが、ただ検査する装置を提供するビジネスから、半導体デバイスの歩留まりマネジメントや、開発マネジメントまで提供するビジネスになった点において、画期的な戦略である。

また、前節でファイブフォース分析の結果、買い手である半導体デバイスメーカー・ファウンダリの脅威が最重要要因であり、この脅威を減らす戦略がこの市場におけるもっとも有効な戦略であると分析した。これに対しても、この戦略は半導体デバイスメーカー・ファウンダリの利益の源泉である歩留まりや開発をマネジメントすることによって、買い手の脅威を低くすることができる点においても、非常に有効な戦略であると言える。

三つ目は、サポート体制の充実にある。グローバルな視点から、アメリカ、ヨーロッパ、日本、アジア太平洋地域にサポート拠点を展開している。これによって、常に顧客のニーズをリアルタイムに収集でき、それが新製品・サービスの開発にフィードバックでき、未来を予見する力を生んでいると推測する。

以上の分析結果から A 社の経営戦略を図 3-18 にまとめる。一つ目の戦略は、多額の研究開発費の投入に基づいた漸次的な技術の向上と、製品開発と新製品・サービスの継続的な投入である。これにより、製品の検査能力と解析能力を定常的に強化し続けることで、市場における技術的な優位性を持続している。二つ目の戦略は、半導体製造装置との一貫性・連動性を高め、検査結果を正しく迅速に製造装置にフィードバックする能力を高めるために、半導体製造装置メーカーと協働することである。三つ目の戦略は、顧客ニーズを細かく聞き取るサポート体制を確立していることである。これらの二つ目と三つ目の戦略は、ユーザーの歩留まり向上力や開発力を後押しするだけでなく、半導体製造全体のコンサルティングが可能になっている点に戦略としての強さがある。

この様に、A 社の戦略の特長は、高い市場シェアを活かした製品・サービス開発によるポジショニングの最適化と、多額の研究開発費の投入や他社との業務提携、サポート体制の強化によるコア・コンピタンスの強化を、実践の中で並行して持続し続けていることにあると考える。

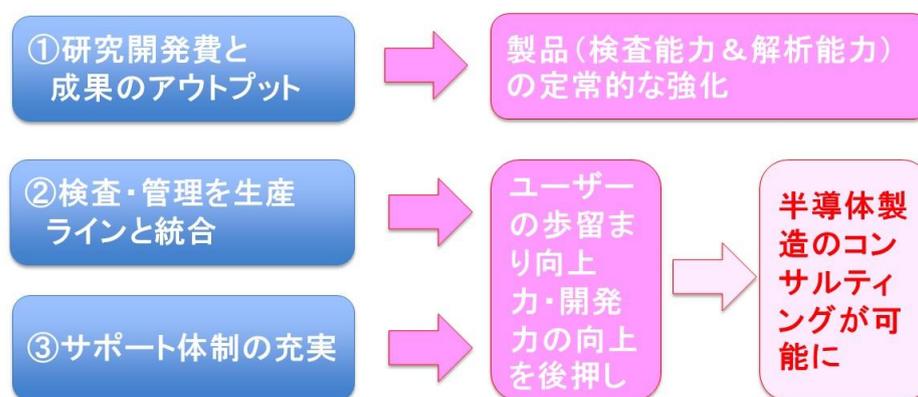


図 3-18 A 社の経営戦略の変化

#### 3.4.2. B社の戦略分析

B社は、リーマンショック前後で売上がほとんど変わっておらず、市場成長率と比較した成長率が低い。A社と比較して製造装置との一貫性や連動制に乏しい製品ラインナップや機能から十分抜け出せていないことが、シェアを徐々に低下させている一因であると推測する。B社については、これまでの調査結果だけでは戦略性が十分見えて来なかったため、戦略分析は行わない。

#### 3.4.3. C社の戦略分析

C社は、リーマンショックを境に売上を徐々に伸ばしており、市場成長率よりも高い成長率を達成している。このC社の成長の源泉として実践している経営戦略は、以下の2つであると推定される。

一つ目は、この3社では最も高い研究開発比率である。毎年およそ3千万ドル、売上の20%以上を研究開発費として積極的に投資し、次世代の新しい製品やサービスを生み出していくために必要なコア・コンピタンスを強化していることである。これにより、毎年新製品や新サービスを投入できるようになっており、かつそれらには常に新しい独自の技術やアイデアを採用していることで、高い顧客満足度を得て、毎年高い成長率を上げることが可能となっている。

前節でファイブフォース分析の結果、競争企業間の敵対関係の脅威が最重要要因の一つであり、この脅威を減らす戦略がこの市場における有効な戦略であると分析した。これに対してこの戦略は、可能な範囲での技術のキャッチアップによって技術や情報の格差を小さくする努力をしている点において、競争企業間の敵対関係の脅威を低くすることができ、有効な戦略であると言える。

二つ目は、半導体製造装置メーカーとの業務提携などの協働により、製造装置と連携させることで、生産工程の連動制を強化し、歩留まりや開発をマネジメントできるように進化してきたことである。これにより、短期間で生産性を引き上げ、収益を向上させられ、さらに、新しいデバイスの開発期間を短縮できる装置となった。その結果、デバイスの微細化・高集積化、商品寿命の短期化、低価格化などのダイナミックな変化の中でも常に成長できたと考える。

この半導体製造装置メーカーとの業務提携の戦略はA社の戦略分析の中で述べた様に、半導体検査装置メーカーにとっては、非常に有効な戦略であると言える。

#### 3.4.4. 3社の分析結果のまとめ

本市場における主要3社の戦略を分析した結果、本市場で実行されていて、かつ有効と考えられる戦略は以下の3つに要約される。

- ・多額の研究開発費の投入に基づいた漸次的な技術の向上と、製品開発と新製品・サービスの継続的な投入
- ・半導体製造装置との一貫性・連動性を高め、検査結果を正しく迅速に製造装置にフィードバックする能力を高めるために、半導体製造装置メーカーと協働すること
- ・顧客ニーズを細かく聞き取るサポート体制

特に、A社とC社から見出された、半導体製造装置メーカーとの協働という戦略は、従来の「半導体ウェハを検査するための装置」を販売するだけのビジネスから、「半導体製造全体のコンサルティング」までを一つのビジネス（事業分野）としたという点において、画期的な戦略である。この戦略は、顧客の潜在的なニーズに適切に応えた大規模な戦略が実行されている点から、創発的な要素を含んだ計画的戦略が実行されたものであると推測される。ここから、A社とC社の戦略は3.2節で定義した「いかに競争に成功するか、ということに関して戦略計画が実践の中で構築されるもの」という戦略の定義に合致した事業戦略形成であったと言える。

今後、本研究対象の半導体検査装置市場は、半導体デバイスに対する高いニーズがある限り、これからも年率20%程度の高い成長率を維持し続けるであろう。その中で、A社は現在の経営戦略を続けることで、市場での地位を維持し続けると予測する。また、半導体製造装置市場も高度に寡占化が進んでいる<sup>4,5</sup>ことから、これらの企業との独占的な提携を結ぶことができれば、市場での地位はより堅固なものとなるだろう。

それに対してB社は、まず営業利益の向上のための抜本的な経営の改善、新製品の開発と投入、半導体製造装置メーカーとの提携など、多くの対策を施すことが急務である。C社については、企業規模が小さいながらも高い技術に裏打ちされた製品を安定的に販売し、半導体製造装置メーカーとの提携も進めており、非常に効率的で堅実な経営であると判断する。今後も、A社がカバーしていないニッチな市場をしっかりと確保することによって、近い将来、市場2位のシェアを安定的に確保することも十分可能であると予測する。今後、高級機種と同等レベルの性能の装置を開発し、A社のシェアを奪取できるかどうか、それ以上の成長の可否を決めるだろう。

### 3.5. 本開発光源の戦略

#### 3.5.1. SWOT 分析による戦略立案

前節までの戦略分析の結果を踏まえて、本開発光源（以下、本光源）を半導体検査装置市場に販売する戦略を立案するため、まず戦略計画に基づいた戦略を検討した。本光源は、Ansoff (1965) の成長ベクトルマトリックスの上では、新規製品・技術を既存市場に販売することから「製品開発」に分類される。製品開発の場合、既存の販路を利用して、既存顧客に新製品を販売することで成長を見込む戦略となる。この成長ベクトルに基づいて本光源の事業の方向性について機会と強みの一致点を見出すため、SWOT 分析を行った。

SWOT 分析は、目標を達成するために重要な内外の要因を以下の2つの軸に分けて特定することを目的とした分析方法である。

- ・ 内的要因・・・強みと弱み
- ・ 外的要因・・・機会と脅威

内的要因には、人材・財務・製造力・技術やマーケティングの4Pである製品 (Product)、価格 (Price)、流通 (Place)、プロモーション (Promotion) なども含まれる。外的要因には、経済環境、技術革新、法令・社会環境・文化の変化などが含まれる。

一般的なSWOT 分析で使用される2×2のマトリックスに従い、図3-19に本事業に関する分析結果を示す。この分析結果からは、2つの状態が導かれた。

	外的要因	内的要因
機会と強み	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 半導体検査装置市場の拡大</li> <li>・ 高輝度化のニーズの向上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 従来光源での経験と信頼に基づく顧客との強い関係性</li> <li>・ 受光器も製造していること</li> <li>・ 技術開発力</li> </ul>
脅威と弱み	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 競合技術の台頭</li> <li>・ 競合メーカーの台頭</li> <li>・ 破壊的イノベーション</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 開発スピードが遅い</li> <li>・ 国内生産コストが高い</li> </ul>

図3-19 一般的なマトリックスによるSWOT 分析の結果

・ 半導体検査装置市場の拡大、高輝度化のニーズの向上というプラスの外的要因が継続しているが、競合企業の強い特許技術に基づく競合技術の台頭、競合メーカーの台頭、レーザー生成プラズマ光源のキセノンランプに対する破壊的イノベーションという自社にとってマイナスの外的要因が新たに発生している。ここで述べた破壊的イノベーションとは、

2.2.1 項で述べた「競合企業である光源メーカーの Y 社」により上市された放電方式のレーザー生成プラズマ光源を意味する。

・従来光源（キセノンランプ）での経験と信頼に基づく顧客との強い関係性、光源だけではなく受光器も製造していること、破壊的イノベーションを別のアプローチでキャッチアップできる技術開発力というプラスの内的要因を保有しているが、同時に X 社の体制に起因する、開発スピードが遅い、国内生産コストが高いというマイナスの内的要因も抱えている。

この様に、この 2×2 のマトリックスは自社や製品の状態を整理するためには役立つが、これだけでは戦略は生まれない。そこで、この分析結果を元にして、さらに沼上（2009）の 3×3 のマトリックスを使用して行った本光源の SWOT 分析の結果を図 3-20 に示す<sup>7)</sup>。

	<u>内部の強み (S)</u> ・従来光源での経験と信頼に基づく顧客との強い関係性 ・受光器も製造していること ・技術開発力	<u>内部の弱み (W)</u> ・開発スピードが遅い ・国内生産コストが高い
<u>外部の機会 (O)</u> ・半導体検査装置市場の拡大 ・高輝度化のニーズの向上	<u>SO</u> ・従来光源の販売拡大 ・技術開発によるニーズのキャッチアップ ・正確な顧客ニーズの把握による製品仕様の最適化	<u>WO</u> ・開発方針の早期決定 ・開発体制の改善
<u>外部の脅威 (T)</u> ・競合技術の台頭 ・競合メーカーの台頭 ・破壊的イノベーション	<u>ST</u> ・新しい技術開発による競合技術のキャッチアップ ・模倣防止のための知財戦略	<u>WT</u> ・競合企業との業務提携、M&A ・海外生産へのシフト

図 3-20 X 社の取り得る戦略

出所：沼上（2009）を元に筆者作成

このマトリックスは、強みと弱み・機会と脅威の 2 つの軸をそれぞれ 4 象限に分けて掛け合わせ、各象限毎に考えられる戦略を立案していくものである。これを使うことにより、

自社が取り得る多様な戦略を、外部環境をポジショニング・ビューによって、内部環境をリソース・ベースド・ビューによって、多角的に分析することができる。

この分析の結果、内部の強みを軸にすると、外部の機会との組み合わせから従来光源の販売拡大・技術開発によるニーズのキャッチアップ・正確な顧客ニーズの把握による製品仕様の最適化、外部の脅威との組み合わせから新しい技術開発による競合技術のキャッチアップ・模倣防止のための知財戦略という戦略が導き出された。一方、内部の弱みを軸にすると、外部の機会との組み合わせから開発方針の早期決定・開発体制の改善、外部の脅威との組み合わせから競合企業との業務提携、M&A (Mergers and Acquisitions/合併と買収)・海外生産へのシフト、という戦略が導き出された。

これらを整理すると二つの戦略にまとめられる。一つは、①主に自社の高い技術開発力と顧客との強い関係性という内部の強みと外部要因から導き出された、自社のみにより市場の一部を確保するという戦略である。もう一つは、②前述の戦略に加えて、主に自社の体制と競合企業の強い特許技術という内部の弱みと外部の脅威から導き出された、競合企業との業務提携や M&A により市場全体を確保するという戦略である。

### 3.5.2. ビジネスモデルキャンバスによる戦略立案

これらの二つの戦略について、ビジネスモデルキャンバスに描く。ビジネスモデルキャンバスとは、Osterwalder, A., & Pigneur, Y. (2010)<sup>23</sup>によって開発された、ビジネスモデルを理解するためのフレームワークである。これを使うことによって、そのビジネスに重要な9つの要素の関係を図式化でき、ビジネスの全体像や事業構造を理解しやすくなる。9つの要素の顧客セグメント(CS)、顧客関係(CR)、チャンネル(CH)、価値提案(VP)、主要活動(KA)、リソース(KR)、パートナー(KP)、コスト構造(CS)、収益の流れ(RS)は、それぞれ相関関係にある。

最初に自社製品のみに基づく①の戦略の場合のビジネスモデルキャンバスを図 3-21 に示す。顧客である半導体検査装置メーカーはパートナーでもあり、これまでキセノンランプなどの光源で構築した強い関係性からいち早く正確な顧客のニーズを掴み、開発した試作機の評価を受けることが可能である。その情報を元に、これまでに保有しているものに加えて本研究により獲得した、物理的(LD、ランプ技術)・知財(基本特許、周辺特許)・人的(光学設計、ランプ&LDの設計)・製造(設備・技術)・財務(社内資金)というリソースに基づき、設計開発・高輝度化研究開発・顧客による評価・コストダウンなどの主要活動を行う。コスト構造は、製造(外注費、材料、工賃、管理費)が中心であり、その低減が課題である。

これらに基づいて開発した光源装置を用いて、従来光源の 20 倍以上の高輝度化によるタスクの大幅向上、高精細化による検査の高精度化、高倍率化・2 倍以上の長寿命化によるメンテナンスコストの低減・従来光源並みの高安定という価値を、適切な仕様と価格にまとめて提案する。この価値を、カスタム対応力と品質と技術力に魅力を感じ、性能に見合っていれば高価格でも購入する半導体検査装置メーカーとの顧客関係の中で、従来顧客に対し、従来の現地営業担当者を通じて提案する。それにより販売可能な顧客セグメントは、すべての半導体検査装置ではなく、一部の半導体検査装置メーカーの上位機種に限定される。これは、競合メーカーとの市場における競争があり、市場ニーズの全体を本研究で開発した技術だけではカバーすることはできないからである。これらによって得られる収益の流れは、半導体検査装置のうち上位機種に限定された装置向けに本高輝度光源を販売することで得られる範囲に限定され、上位機種以外における光源市場の競争優位性は乏しく、シェア向上については別の技術や方法が必要となる。そのため、この戦略ではこの市場において十分な競争優位性を確保すること、またそれを維持することは困難であることが分かる。

そこで、自社製品に基づく戦略に加えて、競合をパートナーとする②の戦略を実施した場合のビジネスモデルキャンバスを図 3-22 に示す。この戦略を取り得た場合、パートナーには競合企業が加わり、新しい技術によって、より広い市場を獲得し、さらに技術的シナジー効果が得られる。主要活動にはシナジー効果の創出が加わり、リソースには開発リソースとコア・コンピタンスの継続が追加される。コスト構造は自社の視点では特に変わらない。これらに基づいて提案される価値には、製品ラインナップの拡大が加わり、より広い市場ニーズをカバーすることが可能となる。これらを前述と同じ顧客関係の中で同じチャネルを用いて提案する。それにより販売可能な顧客セグメントは、すべての半導体検査装置メーカーの幅広い要求に応えることが可能となり、全製品ラインナップが対象となる。これらによって得られる収益の流れは、すべての半導体検査装置向けに本高輝度光源を販売が可能となり、半導体検査装置の光源市場で持続的競争優位性を確保できるようになる。注意すべき点としては、競合をパートナーとする②の戦略は、あくまで自社製品のみに基づく①の戦略だけでは不足する部分を補完するものでなくてはならない点である。それは、自社が構築してきた技術を捨て、競合との M&A 戦略のみに頼む成長では、将来のブレークスルー製品を創出するために必要なコア・コンピタンスを喪失するリスクがあるからである。

Key Partners	Key Activities	Value Propositions	Customer Relationships	Customer Segments
<p>パートナー</p> <p>半導体検査装置メーカー：濃密な関係を構築しており、具体的なニーズの提供や、評価機の評価が可能。</p>	<p>主要活動</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>設計開発</li> <li>高輝度化研究開発</li> <li>顧客による評価</li> <li>コストダウン＝顧客ニーズと価格のバランス</li> </ul> <p>Key Resources</p> <p>リソース</p> <p>物理的：LD、ランプ                      知財：基本・周辺特許                      人的：光学設計、ランプ&amp;LDの設計製造                      財務：社内資金で十分</p>	<p>価値提案</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>タスクの大幅向上、高精度化による検査の高精度化、高倍率化：従来光源の輝度20倍</li> <li>2倍以上の長寿命化による、メンテナンスコストの低減：寿命1万時間</li> <li>従来光源並みの高安定</li> </ul>	<p>顧客関係</p> <p>半導体検査装置メーカー：カスタム対応力と品質と技術力に魅力を感じて、性能に合った製品を求め、価格でも購入する。</p> <p>Channels</p> <p>チャネル</p> <p>従来顧客                      現地営業担当者</p>	<p>顧客セグメント</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>一部の半導体検査装置メーカーの上位機種に限定</li> </ul>
<p>Cost Structure</p> <p>コスト構造</p> <p>製造（外注費、材料、工賃、管理費）：低減が課題</p>		<p>Revenue Streams</p> <p>収益の流れ</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>半導体検査装置のうち上位機種に限定された装置向けに本高輝度光源を販売。</li> <li>上位機種以外における光源市場では十分な競争優位性が確保できない。</li> </ul>		

図 3-21 自社製品のみに基づく①の戦略のビジネスモデルキャンバス

<p><i>Key Partners</i></p> <p>パートナー</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>半導体検査装置メーカー：濃密な関係を構築しており、具体的なニーズの提供や、評価機の評価が可能。</li> <li>競合企業：新しい技術によって、より広い市場を獲得し、さらに技術的シナジー効果が得られる。</li> </ul>	<p><i>Key Activities</i></p> <p>主要活動</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>設計開発</li> <li>高輝度化研究開発</li> <li>顧客による評価</li> <li>コストダウン＝顧客ニーズと価格のバランス</li> <li>シナジー効果の創出</li> </ul>	<p><i>Key Resources</i></p> <p>リソース</p> <p>物理的：LD、ランプ          知財：基本・周辺特許          人的：光学設計、ランプ&amp;LDの設計製造          財務：社内資金で十分          技術：開発リソースの追加獲得          コア・コンピタンス：開発の継続による維持</p>	<p><i>Value Propositions</i></p> <p>価値提案</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>タスクの大幅向上、高精度化による検査の高精度化、高倍率化：従来光源の輝度10～20倍</li> <li>2倍以上の長寿命化による、メンテナンスコストの低減：寿命1万時間</li> <li>従来光源並みの高安定</li> <li>製品ラインナップの拡大</li> </ul>	<p><i>Customer Relationships</i></p> <p>顧客関係</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>半導体検査装置メーカー：カスタム対応力と品質と技術力に魅力を感じて、性能に合った製品を求め、高価格でも購入する。</li> </ul> <p><i>Channels</i></p> <p>チャネル</p> <p>従来顧客          現地営業担当者</p>	<p><i>Customer Segments</i></p> <p>顧客セグメント</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>すべての半導体検査装置メーカーの全製品ラインナップが対象</li> </ul>
<p><i>Cost Structure</i></p> <p>コスト構造</p> <p>製造（外注費、材料、工賃、管理費）：低減が課題</p>			<p><i>Revenue Streams</i></p> <p>収益の流れ</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>すべての半導体検査装置向けに本高輝度光源を販売。</li> <li>半導体検査装置の光源市場で持続的競争優位性の確保が可能。</li> </ul>		

図 3-22 競合をパートナーとする②の戦略のビジネスモデルキャンバス

### 3.5.3. 戦略立案のまとめ

ここでこの製品に関する戦略の変化について振り返る。本光源の開発を通じた事業実践の中では、自社製品のみに基づく①の製品レベルの戦略を考えていた。その時点では、本光源によって半導体製造装置用の光源市場において十分競争優位性を確保できると見込んでいた。しかし、市場を深く分析していくと、広い顧客ニーズを考慮することで競合との棲み分けが必要になることが明らかになり、競争優位性が不十分であることが分かった。そこで、この市場における競争優位性を高めるためには、②の競合企業との業務提携やM&Aという事業戦略が構想として創発的に現れた。この意味において、この戦略は実践の中から創発した事業戦略であると言える。ここから、X社が本光源において立案した事業戦略は、本光源の開発を通じた事業実践の中で、製品レベルの戦略から、競合企業との業務提携やM&Aなどの事業戦略が構想として創発的に現れたものであった。この意味において、この戦略は本論文における戦略の定義に合致した事業戦略形成であったと言える。

ただし、この戦略は本光源だけを考えた事業戦略であり、経営戦略の視点から見た場合には人的・財務的なリソース、コストに見合ったシナジー効果を生むことができるか、などの点から十分に検討する必要がある。

### 3.6. 実行されたM&A戦略

これまで本光源について市場の分析、顧客の経営戦略の分析、本事業の戦略の立案をしてきた。これに従って、実際に本事業の戦略を進行していたところ、筆者のこれまでの事前の検討とは無関係な経緯から自社であるX社と競合企業Y社のM&Aが双方の経営層の判断によって進行し、X社によるY社の買収という形で成立した。そこで本節では、実際に実行されたこのM&A戦略について概観する。

M&A (Mergers and Acquisitions/合併と買収) とは、2つ以上の企業が一つに合併したり、ある企業が他の企業を買収して経営権を獲得したりする行為のことである。広義には、企業全体の合併・買収だけでなく、一部の事業を買収することや提携（アライアンス）までを含める場合もある。M&Aの譲受側の主な目的は、シナジー効果の創出・時間節約・経営資源の有効活用・投資コストの節約・リスクの低減などによる、規模拡大・既存事業強化・新規市場参入・スキルギャップ解消・人材や技術の確保などである。

近年ますます激化しているグローバル競争の中で、どの企業も競争環境の速い変化に追従していくことが求められている。この環境下において、M&Aは事業を加速させるために非常に有効な戦略である。

第1章で概説した様に、半導体検査装置市場では検査工程の作業時間短縮及び測定精度

向上のため、高輝度な紫外可視領域の光源が求められている。また、今後さらに微細化が進む次世代の半導体製造技術に対応するため、より波長が短い光源への要求が高まってくると見込まれている。Y社は現在、高輝度な紫外可視光源であるレーザー励起光源市場を独占しており、また、従来の半導体検査用光源よりも波長が短い極紫外線（以下 EUV：Extreme Ultra Violet）光源を世界で唯一製品化している企業である。X社は、従来からキセノンランプや水銀キセノンランプなど、半導体検査用の光源を開発、販売してきた。そこで、X社の取り扱う従来の光源や今回開発したレーザー生成プラズマ光源に、Y社のレーザー励起光源および EUV 光源を加え、X社グループの製品ラインナップを拡充することで、半導体検査装置市場からの要求に持続的に対応することができるようになる。

また、両社が培ってきた光源開発技術を組み合わせることで開発速度を上げるとともに、より高付加価値な製品を開発し、環境分析用途など半導体検査以外の新たな市場を開拓できる。さらに、X社は光源に加えて受光素子も生産している世界でも数少ない企業である。これらの光源と受光素子を組み合わせ、両社の製品性能を最大限に引き出すことで、市場の要求に対し最適な光源と受光素子を展開していくことが可能となる。また、X社は分析市場などを中心に強い販売チャンネルを保有しており、Y社の販売・サービス網を充実させることが可能となる。これらの点から、この買収は両社が相互補完関係にあり、両社の戦略が一致した友好的な買収であったと言える。

### 3.7. まとめ

本章では、開発したレーザー生成プラズマ光源の主要な市場である半導体検査装置市場に対する事業戦略を立案するために、半導体検査装置市場の動向の調査と分析を行い、市場各社の戦略分析を行った。その結果、A社とC社からは、半導体製造装置メーカーとの協働によるビジネスモデルの変革というユニークな戦略を見出した。その上でリソース・ベースド・ビューとポジショニング・ビューの両方の視点で戦略を立案できる3×3のマトリックスによるSWOT分析を本開発光源について行い、二つの戦略を導き出した。これらの事業戦略をより具体化するためにビジネスモデルキャンバスを作成し、二つの戦略のそれぞれの持続的競争優位性の有無とその範囲を検討した。その結果、後者の戦略において、開発した光源の半導体検査装置市場における持続的競争優位性を確保できる戦略であると確認した。

分析したA社とC社から見出された半導体製造装置メーカーとの協働というビジネスモデルの変革を伴う戦略は、顧客の潜在的なニーズに適切に応えた大規模な戦略が実行されている点から、創発的な要素を含んだ計画的戦略が実行されたものであると推測される。

この点から、結果的に競争に成功している点、及び戦略計画が実践の中で構築されている点において、A社とC社の戦略は3.2節で定義した「いかに競争に成功するか、ということに関して戦略計画が実践の中で構築されるもの」という戦略の定義に合致した事業戦略形成であったと言える。

加えて、X社が本光源において立案実行した事業戦略は、本光源の開発を通じた事業実践の中で、製品レベルの戦略から、競合企業との業務提携やM&Aなどの事業戦略が構想として創発的に現れたものであった。この意味において、この戦略も本論文における戦略の定義に合致した事業戦略形成であったと言える。

## 第3章 参考文献・引用

1. 青嶋稔・小島健一（2014）「製造業にも求められる事業開発型ビジネスモデルへの転換」知的財産創造, 2014年6月号.
2. Moore, G. E. (1965) *Cramming more components on to integrated circuit*, Electronics, Vol.38.
3. 井上敬介（2014）「ムーアの法則とその経済的評価:日本の半導体産業に対する省察」研究・技術計画学会 第29回年次学術大会.
4. SEMI Year-end Consensus Forecast 2005～2016（「SEMI世界の半導体製造装置の展望に関する調査結果 2005年～2016年度版」SEMI ジャパン）
5. 『世界半導体製造装置・試験/検査装置市場年鑑 2005年, 2008年, 2011年, 2014年, 2016年』 グローバルネット株式会社.
6. Barney, J. B. (2002) *Gaining and Sustaining Competitive Advantage*, Second Edition, Prentice Hall.（岡田正大訳『企業戦略論【上】基本編—競争優位の構築と持続』ダイヤモンド社, 2003年）
7. 沼上幹（2009）『経営戦略の思考法』 日本経済新聞出版社.
8. Mintzberg, H., Ahlstrand, B., and Lampel, J. (1998) *Strategy Safari: A Guided Tour Through The Wilds of Strategy Management*, New York: The Free Press.（齋藤嘉則監訳『戦略サファリ』東洋経済新報社, 1999年）
9. Ansoff, H. I. (1965) *Corporate Strategy: An Analytic Approach to Business Policy for Growth and Expansion*, New York, NY: McGraw Hill, Inc.（広田寿亮訳『企業戦略論』産業能率大学出版部, 1976年）
10. 庭本佳和（2012）『経営学史業所叢書第IX巻アンソフ』文眞堂.
11. Porter, E. M. (1980) *Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors*, Free Press.（土岐坤・中辻萬治・服部照夫訳『競争の戦略』ダイヤモンド社, 1995年）
12. Sterman, D. J. (2000). *Business Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World*, McGraw Hill Companies, Inc.（枝廣淳子・小田理一郎訳『システム思考 複雑な問題の解決技法』東洋経済新報社, 2009年）
13. Senge, M. P. (1990). *The Fifth Discipline. The Art & Practice of the Learning Organization*, Random House, New York.（枝廣淳子・小田理一郎・中小路佳代子訳『学習する組織 システム思考で未来を創造する』英治出版, 2011年）
14. 枝廣淳子・内藤耕（2007）『入門！システム思考』講談社.
15. 小林好宏（1968）「寡占経済の動態分析—III」北海道大学経済学研究, 18(3):169-228.

16. A 社アニュアルレポート 2004 年～2016 年
17. B 社アニュアルレポート 2004 年～2016 年
18. C 社アニュアルレポート 2004 年～2016 年
19. D 社アニュアルレポート 2009 年
20. F 社プレスリリース 2008 年
21. 湯之上隆 (2009) 『日本半導体敗戦』 光文社.
22. 肥塚浩 (2011) 「半導体製造装置産業の現状分析」 立命館経営学第 49 巻第 5 号.
23. Osterwalder, A., & Pigneur, Y. (2010). *Business Model Generation*, (小山龍介訳 『ビジネスモデル・ジェネレーション』 翔泳社, 2012 年)

## 第4章 結論

### 4.1. 研究目的と結果

#### 4.1.1. 本章の目的

本章では、本研究の目的と研究内容、及びその結果についてまとめ、結論を示す。さらに本研究の光産業創成における意義と今後の課題及び展望について述べる。

筆者の所属企業の光源ビジネスにおけるビジョンは、新しい光源技術の開発によって人々に新たな価値をもたらし、世界に新たな光産業を生み出すことであり、現在のミッションは、半導体検査装置市場に対し、新しい技術に基づいた従来よりも高輝度長寿命な高輝度紫外可視光源を提供し、半導体検査技術の進歩に貢献することである。このミッションの達成のために行った本研究では、半導体検査装置市場からの高輝度化などのニーズに応えるために技術開発を行い、その成果として完成した光源装置に関する事業戦略を立案した。最初に、これらの研究の目的とそれに対する研究内容、及びその結果を以下に示す。

#### 4.1.2. 本研究の目的

- ① ターゲット方式レーザー生成プラズマ光源において 100 W 以下のレーザーパワーによる繰り返し点灯の実現、市場要求に応えた半導体検査装置用高輝度紫外可視光源として開発、及び更なる性能向上のための技術的指針の獲得
- ② 開発した光源の半導体検査装置市場における持続的競争優位性を高めるための事業戦略の立案

#### 4.1.3. 方法

- ① 本光源に関して以下の技術的研究と開発を行った。
  - ・点灯性の定量評価方法の確立
  - ・ターゲット材料の選定
  - ・ターゲット構造の改善
  - ・点灯プロセスの解明
  - ・光源装置の小型化
- ② 半導体検査装置市場と開発した本光源に関して、以下の研究を行った。
  - ・市場分析
  - ・半導体検査装置メーカーの戦略分析
  - ・開発した光源装置を元にした戦略の立案

#### 4.1.4. 本研究の結果

① 学術的には実施例があるものの実用化されていなかったターゲット方式レーザー生成プラズマ光源を実用可能なレベルの技術とするために、ターゲットに関する基礎技術を研究した。具体的には、選定したターゲット材料ごとの点灯性を定量的に評価して最適な材料を選び、ターゲットの構造を改善して、本光源の実用化を可能にした。その結果に基づいた新しい高輝度紫外可視光源装置を開発した。

ここで明らかになったターゲットに必要な仕様は、レーザーパワーを効率よく吸収・蓄積できる形状と、レーザーによる溶融によって適切な量の易電子放出物質をレーザー集光点付近に放出できる材料であることと推測する。形状については、本研究で実施した様なレーザー加熱の効率化のためのヒートダム構造は有効である。

ターゲットの研究の中で点灯のメカニズムについても研究を行い、以下の一つの仮説を提案した。最初にレーザー加熱によりターゲット温度が上昇し、ターゲット表面に溶融池が生成される。レーザー集光点のターゲット温度がある閾値を超えると、そこから酸化バリウムの分子もしくは微粒子がキセノンガス中に放出される。この放出された物質がレーザー光を吸収した結果、大量の電子を放出する。さらに、その電子が逆制動放射によりレーザー光のエネルギーを吸収することで、周囲のキセノン原子に多大なエネルギーを供給してプラズマ化する。

この仮説から、ターゲットから放出された物質が点灯の直接的な原因となるためには、易電子放出物質の仕事関数の低いことが重要であると推測され、その妥当性は実験で確かめられた。

これらのターゲットに関する研究結果により、従来 kW 級のレーザーが点灯に必要なものを、100 W 以下のレーザーで点灯することを可能とした。この結果に加えて顧客ニーズも踏まえ、更に小型化することで市場競争力のある製品に仕上げ、その仕様・特性を評価した。これにより、半導体検査装置市場における本光源装置のポジションを明確にした。

その特性は、75W キセノンランプと比べて波長 250nm において 20 倍の、競合他社製品と比べて波長 250nm において 2 倍の分光放射輝度、キセノンランプや競合他社製品と同等の 0.2%p-p 以下の光出力安定性、さらに 50 回以上の繰り返し点灯性能を達成しており、どの点においても顧客ニーズを満たしていることを確認した。

② 開発したターゲット方式レーザー生成プラズマ光源の主要な市場である半導体検査装置市場における持続的競争優位性を高める事業戦略を立案するために、半導体検査装置市

場の動向の調査と分析を行い、市場各社の戦略分析を行った。その上でリソース・ベースド・ビューとポジショニング・ビューの両方の視点で戦略を立案できる3×3のマトリックスによるSWOT分析を本開発光源について行い、二つの戦略を導き出した。これらの事業戦略をより具体化するためにビジネスモデルキャンバスを作成し、二つの戦略のそれぞれの持続的競争優位性の有無とその範囲を検討した。その結果、後者の戦略において、開発した光源の半導体検査装置市場における持続的競争優位性を確保できる戦略であると確認した。

構成上、本論文においては本光源の技術開発と市場動向の分析から戦略立案を別の章として分けて記述しているが、実践の中においては常に相互関係にあった。例えば、本光源を開発する前段階において市場要求を調査しつつ市場動向を分析し、それらを受けて光源装置の目標仕様を決めて開発を進めた。

## 4.2. 結論

半導体検査装置市場に新しい技術に基づいた従来よりも高輝度長寿命な高輝度紫外可視光源を提供し、半導体検査技術の進歩に貢献するというミッションに対し、本研究では、半導体検査装置市場からの高輝度化などのニーズに応えるために技術開発を行い、その成果として完成した光源装置について、その事業戦略を立案し、一部を実行した。

① 新しいターゲット方式レーザー生成プラズマ光源装置の研究と開発の結果から、この光源は半導体検査装置市場において、上位機種において求められるニーズに応えることは可能性が高く、有用性が確認できた。加えて、これ以外の領域を確保するならば、新たな技術の獲得が必要であることを明らかにした。

② 半導体検査装置市場に対して立案したレーザー生成プラズマ光源の事業戦略は、本光源の開発を通じた事業実践の中で、製品戦略のレベルから、競合企業との業務提携やM&Aなどの事業戦略が構想として創発的に現れたものである。この意味において、この戦略は実践の中から創発した事業戦略であると言える。この点において、X社の戦略は3.2節で定義した「いかに競争に成功するか、ということに関して戦略計画が実践の中で構築されるもの」という戦略の定義に合致した事業戦略形成であったと言える。

同時に、分析したA社とC社のそれぞれの戦略についても、創発性の有無については十分に判断できないものの、結果的に競争に成功している点、戦略計画が実践の中で構築されている点において、本論文における戦略の定義に合致した事業戦略形成であると言える。

### 4.3. 光産業創成における本研究の意義

本研究において、研究開発した技術を用いて新しい光源装置を開発し、技術開発だけでは克服できない要素を見出し、それらに基づいた製品戦略及び事業戦略を検討し、その立案までを実践してきた。この実践を通して、光産業機器において技術的な研究開発をベースにしながら市場情報分析によって戦略を立案する、そのプロセスを具体的に示した。この点において、本研究は光産業創成に貢献するものである。

また、本研究の中で立案していた戦略の一部が、偶然にも所属企業において実行された。ここから、開発した装置の仕様と市場分析から戦略立案したプロセスは、実践において有効であることが証明された。これはつまり、Mintzberg (1998) による創発的戦略だけでなく、Ansoff (1965) による戦略計画の重要性も確認され、この点において戦略は計画だけでも進行する可能性があることを示唆している。これらの事前に検討した戦略から、実行された M&A までについて、内部観察者の視点で考察した例はほとんど無く、この点においても本研究の意義がある。

### 4.4. 今後の課題と展望

ターゲット方式レーザー生成プラズマの研究においては、ランプの点灯性・高輝度化・小型化という課題を解決し、光源装置を開発した。今後の研究の課題としては、半導体検査装置市場以外の市場展開も考慮し、それぞれのニーズに対して点灯回数寿命の改善や、レーザー波長・レーザー入射角・封入ガス圧などの組み合わせによるプラズマ形状や輝度・安定性などを最適化することが挙げられる。これらの課題については、今後の検証と検討が期待される。また、ターゲット内の酸化バリウムなどの易電子放出物質の放出と点灯までのメカニズムについて、仮説を提唱しその検証にあと一歩まで迫った。これについては、より高速な分光分析による微粒子の挙動の解析が有効と考えられ、今後の検証が期待される。

本光源の事業戦略については、今回は2つの方向性の戦略を導き出し、ビジネスモデルキャンバスを用いて事業戦略を立案し、実践した。この過程において、自社と顧客を中心とした分析に基づいた戦略立案に留まり、競合他社の分析が全体として不足していた点には課題が残る。しかし、この競合他社との M&A が成立した今、競合他社の戦略についても内部観察者として研究できる可能性がある。我々と競合他社の両社の戦略立案と実行の過程を、ゲーム理論やシステム思考などにより分析することは、戦略研究の上で非常に有意義であると考えられる。

立案した事業戦略については、個別の製品戦略のレベルでは実践し、事業化の目途を立

てた。この様に、製品開発と並行して事業戦略を立案することにより、常に顧客を意識した開発が可能となり、技術偏重のものづくりから脱却することができた。また、技術開発担当のエンジニアが中心となって立案した戦略が、経営層の計画した戦略と一致する可能性を示した。この点から、現場のエンジニアやミドルマネジメントも、製品戦略・事業戦略だけではなく、経営戦略まで含めた広い視野に立った戦略を立案することの意義は大きいと考える。

以上から、新規事業開発に際して、計画した戦略を実践の中で錬成し、そこから創発的に生まれる新たな戦略を加えながら学習すること、またそれを経営層にフィードバックすることで新たな戦略計画の方向性を示すことを大切にして、今後も新たな事業を開拓していきたい。

## 研究業績

### ・主論文

松本直哉，藤田和久：

「ターゲット方式レーザー生成希ガスプラズマ光源の点灯性向上」

照明学会誌 第102巻, 第6号, p. 226-233

### ・抄録

松本直哉，増田靖，藤田和久：

「半導体関連装置の市場分析とトップメーカーの経営戦略」

一般社団法人経営情報学会 2015年春季全国研究発表大会抄録集 2015

### ・学会発表

松本直哉，増田靖，藤田和久：

「半導体関連装置の市場分析とトップメーカーの経営戦略」

一般社団法人経営情報学会 2015年春季全国研究発表大会 2015

(日本大学生産工学部 津田沼キャンパス, 2015年5月30日)

### ・特許

出願8件、内3件権利化

【特許番号】特許第6023355号

【登録日】2014年10月29日

【発明の名称】発光封体

【発明者】浅井昭典、松本直哉

【特許番号】W02015/083463A1

【登録日】2014年10月29日

【発明の名称】発光封体

【発明者】浅井昭典、松本直哉

【特許番号】US2016/0240365A1

【登録日】2014年10月29日

【発明の名称】Light-emitting sealed body

【発明者】Akinori Asai, Naoya Matsumoto

【特許番号】 特開 2017-27955  
【登録日】 2016 年 10 月 6 日  
【発明の名称】 発光封体  
【発明者】 浅井昭典、松本直哉

【特許番号】 特許第 6111371 号  
【登録日】 2016 年 10 月 6 日  
【発明の名称】 発光封体  
【発明者】 浅井昭典、松本直哉

【特許番号】 特開 2017-130461  
【登録日】 2017 年 3 月 13 日  
【発明の名称】 光源装置  
【発明者】 浅井昭典、松本直哉

【特許番号】 特許第 6200612 号  
【登録日】 2017 年 3 月 13 日  
【発明の名称】 光源装置  
【発明者】 浅井昭典、松本直哉

【特許番号】 特開 2017-224629  
【登録日】 2017 年 3 月 13 日  
【発明の名称】 光源装置  
【発明者】 浅井昭典、松本直哉

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、終始温かいご指導ご鞭撻をくださいました光産業創成大学院大学 藤田和久先生に心より感謝申し上げます。藤田先生には、5年間にわたり、研究と論文作成について初歩から細部に至るすべての面においてご指導いただき、科学研究の基礎を私に据えてくださいました。特に、照明学会への投稿論文の作成に際して、多大なるご指導をいただきましたことを、ここに深く感謝申し上げます。ターゲット方式レーザー生成プラズマの点灯原理の理解のために、様々なアイデアと幅広い人脈によって実験を導いてくださり、得難い経験と知識を与えてくださいました。これらを活かして、これからも様々な光源の研究開発に貢献していきます。

光産業創成大学院大学 増田靖先生は市場分析、戦略分析、及び戦略立案について、終始熱心にご指導ご鞭撻をくださいました。特に、経営情報学会における学会発表に際して、多大なるご指導をいただきましたことを、ここに深く感謝申し上げます。増田先生のご指導の中で、自社、競合、市場・顧客の戦略分析を通して、製品戦略から経営戦略までの幅広いビジョンが創発するという心躍る貴重な経験をさせていただきました。この経験を、これからの技術開発・事業開発に役立てるとともに、多くの人々に戦略分析の面白さと意義を伝えていきたいと思っております。

学位論文審査委員である、光産業創成大学院大学 加藤義章先生、姜理恵先生、楠本利行先生には、丁寧なご指導と貴重なご助言をいただきましたことを深く感謝申し上げます。本論文に対して、様々な視点から貴重なご助言をくださいました、光産業創成大学院大学 瀧口義浩先生、江田英雄先生、坪井昭彦先生、内藤康秀先生、石井勝弘先生、横田浩章先生、森芳孝先生、沖原伸一朗先生、平野美奈子先生、花山良平先生に深くお礼申し上げます。皆様方の厳しくも温かいご指導をいただければ、本論文は完成しませんでした。

プラズマとレーザーの相互作用に関して深く広い知識とご経験を元に丁寧にご指導くださいました、光産業創成大学院大学 沓名宗春先生、三間罔興先生、森清和先生に深くお礼申し上げます。市場分析とマーケティングに関してご指導ご助言くださいました、光産業創成大学院大学 宇佐美健一先生に深くお礼申し上げます。

「ビジネスイノベーターのためのビジネスプロデューサー育成プログラム」(Value incubators production studies :VIPS)の高谷周司先生、小山石行伸先生、加藤誠也先生には、既存概念に囚われない、社会の利益に資するビジネスを形にするプロセスと想いについてご指導くださいました。この学びは、本研究のビジネスにおいても非常に有益なものとな

りました。共に学んだ受講生の皆様方と併せて、深くお礼申し上げます。

光産業創成大学院大学9期生の藤原弘康氏、八木慎太郎氏、西村靖彦氏、松井信二郎氏、坂井光蔵氏、内山文宏氏、真鍋武士氏と、入学当初から学友として共に切磋琢磨できたことに深く感謝いたします。そして、早世した岩本純一氏には、いつまでも残る温かい思い出と共に深い哀悼の意を表します。

光エネルギー分野の中山師生氏、森下桂嗣氏、西村靖彦氏、松井信二郎氏、酒井浩一氏、伊藤正樹氏には、ゼミの中で多くのご指導をいただき、有意義な議論を交わすことができました。皆様方に深くお礼申し上げます。特に、同じ研究室に所属し、大学院大学でも同じ9期生、所属企業でも同期入社である松井信二郎氏には、良い刺激と励ましをいつも与えていただきました。

伊藤邦司氏、大木清造氏、村田浩二氏、石山貴之氏、大西秀美氏、菅沼聖子氏、澤木由佳氏をはじめ、光産業創成大学院大学事務局の皆様には、文献の取り寄せ、出張時の手配、図書の整備、学内の環境整備など幅広い面で研究生活をご支援いただきました。学業に集中できる環境を整えてくださり、本当にありがとうございました。

光産業創成大学院大学に進学する機会を与えてくださいました、所属企業の晝馬明代表取締役社長、竹内純一代表取締役副社長、鈴木賢次常務取締役事業部長、松下孝二製造部長、倉島達夫元部門長に深く感謝申し上げます。5年間の長期に渡り、研究と業務の両立に配慮し支援し続けてくださった、伊藤喜延グループ長、上野和夫部門長、天野広行副部門長に深く感謝申し上げます。また、筆者の研究のために、多くの業務を担ってくださった社内の皆様方に深くお礼申し上げます。特に、実験や熱シミュレーションなどの実施にあたり、浅井昭典氏、高田悠介氏、登川浩司氏、村山恭一氏の熱心な協力を得たことを記すとともに、心より感謝申し上げます。仕事をしながら研究活動を継続できたのは、皆様方のご支援とご協力あつてのことでした。

ここに挙げた方々の他にも、多くの方々のご助力、ご助言により、本研究を進めることができました。お名前を記すことの出来なかった多くの皆様方にも、この場を借りてお礼を申し上げます。

最後に、離れた地から様々な面でいつも支えてくれた神戸に住む祖母、父、母、弟家族、妹家族、豊明に住む義父、義母に心から感謝します。そして、仕事をしながらの博士課程入学を快く承諾し、どのような状況においても応援し支え続けてくれた妻 芙美に、心からの感謝を捧げます。

2018年6月

松本直哉