

博士論文

ULEB 照射源の販売事業拡大のための
線量測定技術開発と製品開発プロセスの分析

光産業創成大学院大学
光産業創成研究科

松井信二郎

2018 年 3 月



要旨

本研究は、超低エネルギー電子線（Ultra-Low energy Electron Beam：以下 ULEB と略記）照射源の販売事業拡大のための線量測定技術開発とその経営学的分析を行うものである。これまで電子線の工業利用では、主に物質への浸透力が高い高エネルギー電子線が使用されてきた。一方、近年 70 kV 以下の加速電圧で発生する電子線である ULEB が注目されており、筆者の所属企業は ULEB 照射源販売の事業拡大に取り組んでいる。

ULEB 照射源を広く産業に普及させるためには、ULEB 照射の特性に対応した吸収線量測定技術が求められるが、既存技術のみでは確立できていないのが現状である。ULEB は、照射源が従来設備と比較して大幅に軽量かつコンパクトであること、また、表面数 μm から数 10 μm レベルの薄膜加工に適用できることから、大量生産のための製造ラインを備えた薄膜加工現場への導入が待ち望まれている。一方、電子線照射プロセス設計及び電子線処理された製品の品質管理には、正確かつ再現性のある線量測定が要求される。しかし、本研究開始当初、ULEB の吸収線量を工業応用に適用可能な手法で正確に測定・管理できる技術が確立されておらず、ULEB 照射源販売事業拡大の壁になっていた。電子線吸収線量を測定するために広く用いられる既存のラジオクロミックフィルム（Radiochromic Film）線量計の厚さ（数 10 μm 以上）が、ULEB の物質中への飛程（数 μm から 30 μm 程度）に比べて極端に大きく、ULEB 吸収線量評価に種々の問題を引き起こすためである。

上記課題を解決するために、本研究では、既存のラジオクロミックフィルム線量計とモンテカルロシミュレーションを利用し、加速電圧 43 kV から 70 kV の ULEB 照射による厚さ数 μm 領域の吸収線量測定手法を開発した。まずラジオクロミックフィルム線量計の応答を 2 MeV 電子線で校正し、フィルム線量計の応答関数を得た。この応答関数を用いて加速電圧 50 kV 及び、70 kV の ULEB による吸収線量を測定し、結果をモンテカルロシミュレーションの結果と比較した。比較の結果、ラジオクロミックフィルム線量計の ULEB に対する応答は 10 - 100 kGy の範囲で線形性を維持していることを確認した。また、モンテカルロシミュレーションは吸収線量の実測値を測定不確かさ (2σ) の範囲内で再現し、工業用プロセス設計に利用できることがわかった。さらに、厚いラジオクロミックフィルム線量計（厚さ 47 μm ）の応答にシミュレーションで計算された線量計内部の深度線量分布を適用することで、線量計内部の線量分布を計算した。この計算された厚いラジオクロミックフィルム線量計内部の線量分布から薄いラジオクロミックフィルム線量計（厚さ 11 μm ）の線量を推定し、それが薄いラジオクロミックフィルム線量計の実測値と測定不確かさの範囲内で一致することを実験的に示した。この手法を工業用 ULEB 照射プロセスに適用することにより、表面数 μm レベルの線量評価が、線量計の厚

さの制限を受けることなく市販のラジオクロミックフィルム線量計を用いることで可能となった。

本研究では、ULEB 照射源販売事業を経営学的側面からも分析し、効率的な製品開発プロセスを実行しながら事業を継続的に拡大していくための知見を得た。本事業は自社シーズ技術であるエックス線管を起点として開発が始まったものである。開発過程は既に経験のある市場での既存製品の延長線上にある新製品開発とは異なり、自社では経験のない新市場を開拓していくものであった。その過程では、当初の事業開発計画からは想定できない意図せざる結果と不確実性に翻弄された様々な困難に直面し、それら課題を解決してきた経緯がある。この過程を顧み、開発者、顧客、既存技術及び、それらを媒介する製品という視点に基づいて記述を行った。その結果、逐次的な試作品の提示を通じて、顧客自身と彼らの製品に対する認識には段階的・不連続的な変容が起こったことを明らかにした。この考察に基づき、「新規市場にむけた製品開発を効率化するためには、製品開発プロジェクトの初期の時点で、開発者と、その製品が完成し利用されるまでに関係するすべての部署の関係者が開発者とコミュニケーションを行った上で製品開発を進めて行くことが必要である」という仮説を得るに至った。この分析結果と仮説を検証していくことにより、今後の事業展開で繰返されるであろう新規市場開拓における製品開発を効率化することができるであろう。

以上、本論文では、ULEB 照射源の線量測定技術開発とその販売事業拡大のための経営学的考察について論じた。ULEB 照射源販売事業は、薄膜加工分野の市場を確立しつつある。今回構築した ULEB 照射プロセスの設計・評価技術により、従来課題であった工業用 ULEB プロセスに求められる電子線線量モニタシステムなどの線量測定装置開発に着手することが可能となり、大量生産プロセスへの ULEB 照射源搭載の見通しを得た。工業用 ULEB プロセスの普及は、今後 ULEB 照射源のさまざまな分野への市場を拡大させ、電子線照射でのみ実現可能な新たな新材料開発、工程開発、及びそのプロセスが持つ対環境性というメリットにより社会に大きな貢献をすることができる。また、ULEB 照射源販売事業の過程で培われる新技術と本研究で得た経営学的知見は、所属企業のあらたな技術シーズとなり、新しい社会的背景及びニーズと融合しながら新規事業のサイクルを継続させていくことを可能にし、結果的に光新産業の創成に寄与すると考えている。

Abstract

This thesis describes the development of a dosimetry method for ultra-low energy electron beam (ULEB) irradiation, and the analysis of the development process toward the business expansion of ULEB sources. High-energy electron beams have been applied in various industries. In addition, nowadays ULEBs with an acceleration voltage of 70 kV or less have been used in applications that involve processing thin films with the thickness of several micrometers.

A dosimetry method for ULEB irradiation is necessary to popularize the use of ULEB sources in industries. At present, the conventional dosimetry methods are not adequate to be applied to ULEB dosimetry. In industrial applications, ULEB sources installed in mass production lines require a reliable dosimetry method for ensuring product quality control. However, dosimetry and dose management methods for ULEB irradiation in industries have not been established because the mismatch between the electron penetration depth of the ULEB irradiation (several to 30 μm) and the thickness of the thinnest commercial radiochromic film dosimeters (11 μm) causes several problems such as non-uniform depth-dose distributions in the dosimeter.

To overcome these problems, a dosimetry method for ULEB irradiation was developed using a commercial film dosimeter and Monte Carlo simulation. First, the dosimeter was calibrated by 2 MeV electron beam irradiation to obtain the response function of the commercial film dosimeter. Then, the response function was used to evaluate the energy deposition of thin-film dosimeters for ULEB irradiation with acceleration voltages of 50 kV and 70 kV, and the evaluated values were compared with the simulation results. The results of the irradiation experiments confirmed that the film dosimeter linearly responds to ULEB irradiation with energies ranging from 10 to 100 kGy. In addition, the Monte Carlo simulation software, PENELOPE, reproduces the measurement dose within a measurement uncertainty of 2σ and works well for relative dose estimation in industrial ULEB processes at the designing stage. Further, the relative dose in a layer thinner than the dosimeter was calculated by applying simulated depth-dose distributions to the measured responses of dosimeters with a thickness of 47 μm . It was experimentally validated that within the measurement uncertainty of 2σ , the measured response of 47 μm dosimeter and the simulated depth-dose distribution can be used to estimate the dose on 11 μm dosimeters. The

application of this method to industrial ULEB processes enabled to perform the dose estimation of commercial radiochromic film dosimeters from the top surface to several μm depth, regardless of their thickness.

Based on the experience of ULEB product launches, the product development process was analyzed from the aspect of business administration to continuously expand the business and to efficiently develop new products. The ULEB product development in the company to which the author belongs originated from the technology seeds of X-ray tube products. The process did not include the extended development of existing products, and thus, pursued new unknown markets. Although unforeseen chaotic events intervened during the development process several times, each of these problems were solved. The development process was reviewed from the following viewpoints: product development members, customers, existing products, and new product that mediated each of the items above. Then, the author found that sequential proposal of several prototype products changed customers' and the development members' perception of the products in discrete steps. It was also found that an unexpressed perception gap existing between the customers and development members in each development stage seemed to cause an unexpected confusion between them. Based on these findings, the author arrived at the following hypothesis for efficient product development to avoid confusion when introducing new products to new markets: It is important to understand the requirements of all the customers who are concerned with products after understanding the positions of the customers ranging from R&D branches to mass production branches to end users from the early stages of the R&D process. Refinement and verification of this hypothesis would contribute to the enhanced efficiency of new product development for new markets in the future.

In this study, a dosimetry method for ULEB was developed by extending commercial dosimeters to the energy range of ULEB sources in combination with Monte Carlo simulation. In addition, the author reached a hypothesis for efficient product development by analyzing the product development process from the aspect of business administration. The business of ULEB sources is being established in a few markets in the industrial field of surface conversion. This study will boost the sales of ULEB sources because the developed dosimetry method for ULEB irradiation will be used in more applications in industries, including the thin-film processing industry. Based on the results, this study provides a cue to develop an advanced dose management system and a ULEB monitoring system for mass production. The ULEB source, which is environment-friendly, will be widely used in industries and will contribute to society by creating new materials with high efficiency. Moreover, the technologies developed by using the ULEB source will give rise to other new technology seeds. Thus, the cycle of creating new technology seeds will promote the creation of new industries,

including those in the field of photonics.

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.1.1	電子線の工業利用の現状と社会的動向	1
1.1.2	本研究と所属企業における ULEB 照射源販売事業の関係	2
1.1.3	事業継続に必要な技術開発	2
1.1.4	新規事業の拡大発展に必要な製品開発プロセス	3
1.2	本研究の目的と期待される効果	4
1.3	本論文の構成	4
	第 1 章の参考文献・引用	6
第 2 章	本研究が対象とする主要技術とその応用分野	7
2.1	放射線とその産業利用	7
2.1.1	放射線とは	7
2.1.2	放射線の産業利用	7
2.2	産業における電子線照射プロセスの概要	8
2.2.1	電子線照射プロセスの原理	8
2.2.2	電子線照射プロセスの歴史	9
2.2.3	電子線照射プロセスの特徴	10
2.2.4	電子線照射プロセスの種類	11
2.2.5	電子線照射施設	13
2.3	電子線照射プロセスの低エネルギー化と ULEB 照射装置	13
2.3.1	電子線照射プロセスとエネルギーの関係	14
2.3.2	工業用 ULEB 照射プロセス	15
2.3.3	電子線の低エネルギー化が工業利用分野にもたらす利点	17
2.3.4	ULEB 照射源の開発背景と工業利用の現状	18
2.4	ULEB 照射源の応用が期待される市場規模	21
2.5	ULEB 照射源の普及に向けた課題	24
	第 2 章の参考文献・引用	25

第 3 章	電子線の線量測定技術	28
3.1	第 3 章の概要	28
3.2	電子線吸収線量の測定	28
3.2.1	吸収線量と線量計	28
3.2.2	工業用電子線照射プロセスにおける吸収線量測定	29
3.3	Far West Technology 社製 FWT-60 ラジオクロミックフィルム線量計と測定システム	31
3.4	ULEB 線量測定における問題点	33
第 3 章の参考文献・引用		36
第 4 章	ULEB 照射されたラジオクロミックフィルム線量計の応答特性評価	38
4.1	第 4 章の概要	38
4.2	第 4 章の研究背景	38
4.3	高エネルギー電子線によるラジオクロミックフィルム線量計応答の校正	40
4.3.1	基準線量計	41
4.3.2	高エネルギー電子線照射装置	42
4.3.3	校正のための高エネルギー電子線照射	42
4.3.4	校正方法	43
4.3.5	高エネルギー電子線照射された基準線量計による校正結果	45
4.4	高エネルギー電子線照射の応答で校正されたラジオクロミックフィルム線量計を用いた ULEB 線量測定実験	47
4.4.1	ULEB 線量測定実験の構成と方法	47
4.4.2	ULEB 線量測定結果	47
4.5	ULEB 線量測定のモンテカルロシミュレーション	49
4.5.1	電子線照射時における吸収線量のシミュレーション構造	49
4.5.2	シミュレーション結果と実測値の比較	50
4.6	結果と考察	53
4.6.1	PENELOPE の有効性	53
4.6.2	産業応用への提案	54
4.7	第 4 章の結論	55
第 4 章の参考文献・引用		56
第 5 章	ULEB 照射されたラジオクロミックフィルム線量計の深度線量分布測定	58
5.1	第 5 章の概要	58
5.2	第 5 章の研究背景と目的	58
5.2.1	研究の背景	58
5.2.2	研究の目的	61

5.3	第5章で行う実験の構成	61
5.4	応答関数非線形性の補正プロセス	63
5.5	実験における測定不確かさ	65
5.6	シミュレーションで得た深度線量分布の検証実験	66
5.6.1	深度線量分布有効性の検証1：積層フィルム	66
5.6.2	深度線量分布有効性の検証2：47 μm 線量計と 11 μm 線量計	68
5.7	結果と考察	72
5.8	第5章の結論	73
第5章の参考文献・引用		74
第6章	ULEB 照射源販売事業における製品開発プロセスとその不確実性に対する分析	76
6.1	第6章の概要	76
6.1.1	本研究における経営学的側面	76
6.1.2	分析の背景と動機	77
6.1.3	第6章の構成	77
6.2	新規事業の定義とQ社のULEB照射源販売事業	78
6.2.1	新規事業の定義	78
6.2.2	Q社における新製品事業とその文化的特徴	79
6.3	ULEB照射源販売事業を効率化するための課題と分析の目的	80
6.3.1	新規事業・新製品開発における成功者の学習観と教育観	80
6.3.2	新規事業において紛糾を生み出す不確実性	81
6.3.3	本分析の目的—新規事業における不確実性とその低減	82
6.4	製品開発プロセスにおける先行研究	82
6.4.1	成功要因研究	82
6.4.2	新製品開発プロセスのリニア・モデル	83
6.4.3	新製品開発プロセスのノン・リニア・モデル	84
6.4.4	リニア・モデルとノン・リニア・モデルの理論的融合を目指したモデル	85
6.5	ULEB照射源販売事業において経験した試作品開発プロセス	87
6.5.1	分析の方法	87
6.5.2	事例概要	88
6.6	開発プロセスの分析	92
6.6.1	先行研究をフレームワークとした分析	92
6.6.2	開発プロセスの概念化による不確実性をもたらす構造の分析	94
6.6.3	製品開発に潜む不確実性の具現化とその低減に対する分析	96
6.7	第6章の結論	97

第 6 章の参考文献・引用	99
第 7 章 結論	102

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 電子線の工業利用の現状と社会的動向

近年、薄膜・表面処理の分野において、物質への浸透度が浅い超低エネルギー電子線 (Ultra-Low energy Electron Beam : 以下 ULEB と略記) 照射装置の需要が高まってきている [1]。電子線の工業利用は 1950 年代にポリエチレンの架橋用途に始まり、現在までラジアルタイヤ架橋、耐熱電線被覆の処理、医療用具の滅菌、食品の滅菌処理など様々な用途に利用されている [1, 2, 3]。電子線の工業利用が始まった当初は、エネルギー 1 MeV 以上の電子線を照射することで、対象物に対して数 mm から数 cm の深さまで電子線を浸透させる加工が目的であった。また、それらの多くは大型の電子加速器を備えた照射施設で行われていた。1980 年代以降、塗装、印刷分野などの薄膜分野へ電子線照射プロセスが応用され始めると、物質への侵入飛程が短い低エネルギー電子線の需要が高まってきた [4, 5]。近年になって、インキ乾燥、コーティング硬化、表面滅菌の分野において従来利用されてきた熱硬化、紫外線硬化、薬剤滅菌などのプロセスを、ULEB プロセスに置き換えるという動きが始まっている [4]。その分野では、さらに薄い加工厚さ (数 μm から数十 μm レベル) が求められる。

この電子線の低エネルギー化は、装置の小型化、放射線遮蔽の簡素化をもたらし、照射システム自体が小型になることで、大量生産ラインへの電子線プロセス適用が容易になる。また、低出力化による装置の電力消費の抑制や硬化対象材料の無溶剤化、滅菌工程のドライプロセス化による薬剤廃棄物低減などを達成でき、対環境面のメリットも併せ持つ点が注目されている [1, 6]。工業用電子線プロセスにおける設備産業の市場規模は国内だけで 2006 年において 130 億円と見積もられ [7]、今後、印刷や機能性フィルム製造における表面改質などの分野への応用が開拓されれば、さらに大きな市場が見込まれる。

1.1.2 本研究と所属企業における ULEB 照射源販売事業の関係

本研究は著者の所属企業（以下 Q 社と示す）における ULEB 照射源の開発および販売を行う新規事業に関するものである。光検出器および光源製品の技術を有する Q 社は、工業用電子線プロセス分野における電子線の低エネルギー化の動向を受け、自社既存製品の要素技術を応用することで ULEB 照射源開発に着手した。この ULEB 照射源販売事業は、Q 社にとっては未経験の新市場を開拓するものであり、また、その市場のユーザにとっては既存技術と異なる、「電子線処理」という未経験技術を携えた製品を販売していくものであった。このような背景もあって、ULEB 照射源販売事業はこれまで多くの困難に直面するものであったが、この困難を乗り越えて製品は完成度を高めることができ、一定の市場を獲得出来るまでに至っている。今後の事業拡大のためは、既存市場でさらなる新規ユーザを獲得するために製品を洗練させつつ、既に獲得した市場とは異なる応用が期待されている異分野市場へも製品販売を展開させていく必要がある。しかし、事業初期の試作品販売を通じた経験から、以下の 2 つが明らかになった。一つは、新製品が市場で受け入れられるためには、製品本体の出力性能向上のための開発だけでなく、エンドユーザの既存工程・既存技術からスムーズに新技術に移行し、安定して利用・管理できるための周辺技術開発が必要ということである。もう一つは、事業の拡大と継続を目的として製品を幅広い分野・市場に展開していくために、新規事業特有の製品開発プロセスがあったということである。今後も自社が、未経験市場のユーザからの要求を、臨機応変かつ効率的に製品に反映しながら事業を継続的に拡大させていくためには、最初の市場開拓経験を通して学習した要素を抽出・分析し、その後の製品開発プロセスを効率化するためのフィードバックが重要である。本研究では、ULEB 照射源販売事業における技術的課題の解決と、今後の事業拡大のために、製品開発プロセスを効率化することを目的とした経営学的分析について述べる。

1.1.3 事業継続に必要な技術開発

本研究が対象とする ULEB 照射源は、大量生産プロセスへ適用されることをターゲットとしており、ULEB 照射源による加工プロセスが普及するためには、電子線処理を経て生産される製品の品質管理のために、正確かつ再現性のある線量測定技術が必須である。加速電圧 70 kV 以下の ULEB 照射源において、線量を正確に測定し、電子線照射プロセスを管理するためには 2 つの課題がある。1 つは 70 keV の電子線エネルギー領域では、その線量測定に関する評価実績・報告がほとんど無いということである。従来電子線吸収線量を測定するための線量計として幅広く利用実績があるのはラジオクロミックフィルム線量計であるが [8]、ラジオクロミックフィルム線量計の ULEB に対する応答自体の信頼性が評価・報告されていない。もう 1 つは、ULEB が線量計に及ぼす物理的作用が、従来の高エネルギー電子線とは異なることに起因するものである。ULEB の物質中における飛程は数 μm から 30 μm 程度であり、その工業利用においても同様の厚さレベルでの線

量評価が求められる。しかし、市販されているラジオクロミックフィルム線量計の厚さは数 $10\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ 程度が一般的であり、これらを ULEB 線量測定に適用することには多くの問題がある [8]。高エネルギー電子線は、厚さ数 $10\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ 程度のフィルム線量計内の厚さ方向には均一なエネルギー付与を行うため、線量計の応答値から換算された吸収線量は線量計の任意の厚さ範囲内で適用できる。一方、ULEB の飛程はフィルム線量計の厚さよりも短いため、線量計の厚さ方向に対するエネルギー付与量の分布は大きな勾配をもつ。フィルム線量計の応答から求められる線量は線量計全体で平均化されるため、このように線量計の厚さ方向に線量勾配が発生するような条件下では、線量計より薄い表面付近の線量が過小評価されることになる。このように、現状では ULEB の工業利用プロセスで望まれる改質厚さ（数 μm ）の線量は正確に評価することができないため、線量計の厚さに関係なく任意の深さ領域の線量を正確に測定できる手法が求められている。この、加速電圧 70 kV 以下の ULEB 線量測定におけるラジオクロミックフィルム線量計の適用性や、線量計より薄い、厚さ数 $\mu\text{m}\sim 30\mu\text{m}$ 程度の線量を評価する研究は報告されていない。ULEB 照射源が市場に受け入れられるためには、線量計の厚さに関係なく、任意の ULEB の工業利用プロセスで利用される電子エネルギーと改質厚さに対応できる、吸収線量測定技術の開発が求められている。

1.1.4 新規事業の拡大発展に必要な製品開発プロセス

事業を継続的に拡大していくためには、優れた技術的特性をもつ製品を保持することに加えて、その時の市場要求を正しく理解し、その要求を確実に製品に反映させるための改良作業を、効率よく進めていくプロセスを見出すことも有用である。本研究が対象とする ULEB 照射源は、自社内の別事業におけるシーズ技術を起点として開発が始まり、これまで数多くの試作品販売と製品開発・改良が行われてきた。その開発過程は、経験のある市場に投入された既存製品の延長線上にあるような新製品開発とは異なり、自社では経験のない未知の市場を開拓するプロセスであった。そこでは様々な困難に直面し、その場での課題を解決してきたが、当初の事業開発計画からは想定できない意図せざる結果と不確実性に翻弄されることもあった。Q 社が ULEB 照射源販売事業を継続して拡大していくためには、すでに市場投入された分野だけでなく、異分野市場への展開が必須である。その際、最初の試作品開発で経験したような、未知の市場への製品投入によるリスクと不確実性に再び直面するかもしれない。しかし、ここで同じプロセスを繰り返しては製品開発に時間を要し、製品の市場投入が遅れ、市場獲得機会を逃すことになりかねない。そこで、自社の既存要素技術をベースとしてそれを発展させて開発した、未経験の技術を伴う新製品を、未経験の市場に投入する事業においては、一つのプロセスから学習し、次のプロセスを効率よく行っていくための学習が必要であろうと考えた。試作品販売における開発プロセスを一事例として、その過程を振り返り分析することで、このような製品開発プロセスにおけるプラン実行の不確実性とその原因を客観的に明らかにしておくことは、今後の事業拡大を効率化するために有用である。

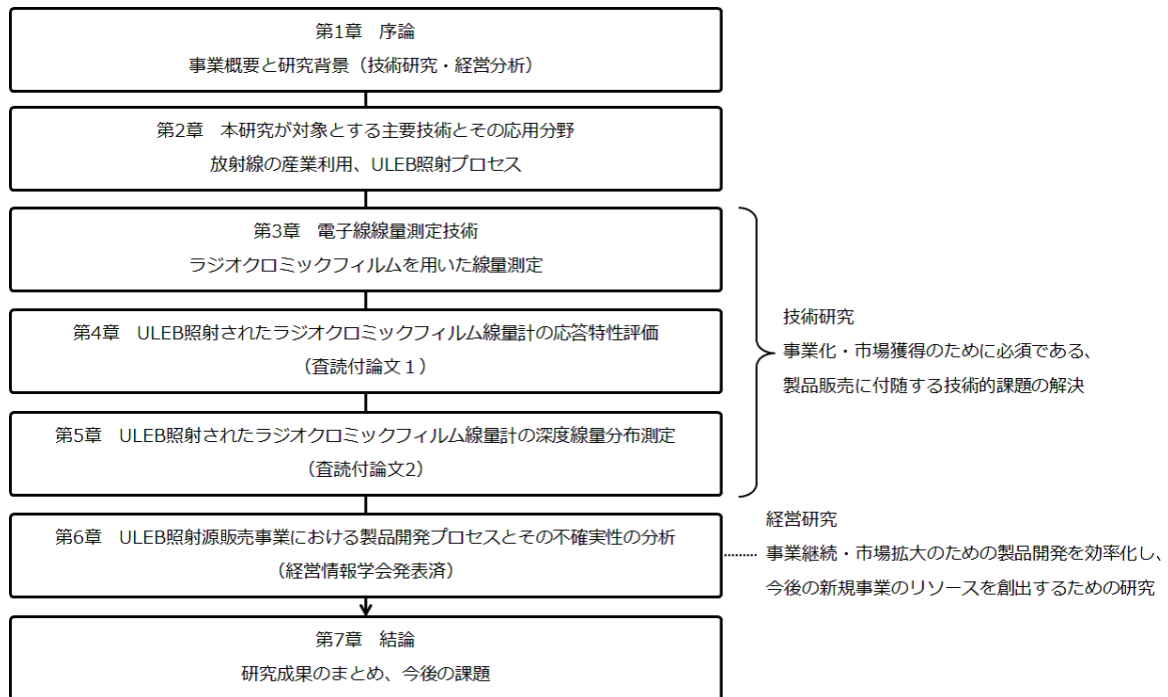


図 1.1 本研究の構成

1.2 本研究の目的と期待される効果

前節までに述べた背景を踏まえ、本研究の目的を下記のとおり設定する。

- 工業用 ULEB 照射プロセスの線量管理に必要な線量測定技術を開発する。
- 未経験の分野に新技術を携えた新製品を販売する事業において、一度経験した製品開発プロセスを分析し、未経験市場の開拓における製品開発に潜む不確実性を低減するプロセスを提案する。

上記目的を達成することにより、ULEB 照射源は線量測定による性能評価が担保され、また市場要求を迅速に製品開発に反映させることができるようになる。そして、今後市場の拡大が確実に見込まれている工業用 ULEB 照射プロセスの普及を加速させることができる。そして電子線照射でしか出来ない新たな新材料開発、工程開発にだけでなく、そのプロセスが持つ対環境性というメリットにより社会に大きく貢献することができる。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を図 1.1 に、また本研究が扱う事業プロセスの青写真と本研究内容に対応づけたものを図 1.2 に表す。ULEB 照射源販売事業は自社シーズ技術と社会背景から生まれたニーズによって始まり、一分野の市場を確立しつつある。今後は、現時点で市場開拓に成功した一分野において製品を更に洗練させていくだけでなく、適用可能性の見込まれる他分野の市場開拓を継続していくことが求められる。ULEB 照射源で開発された

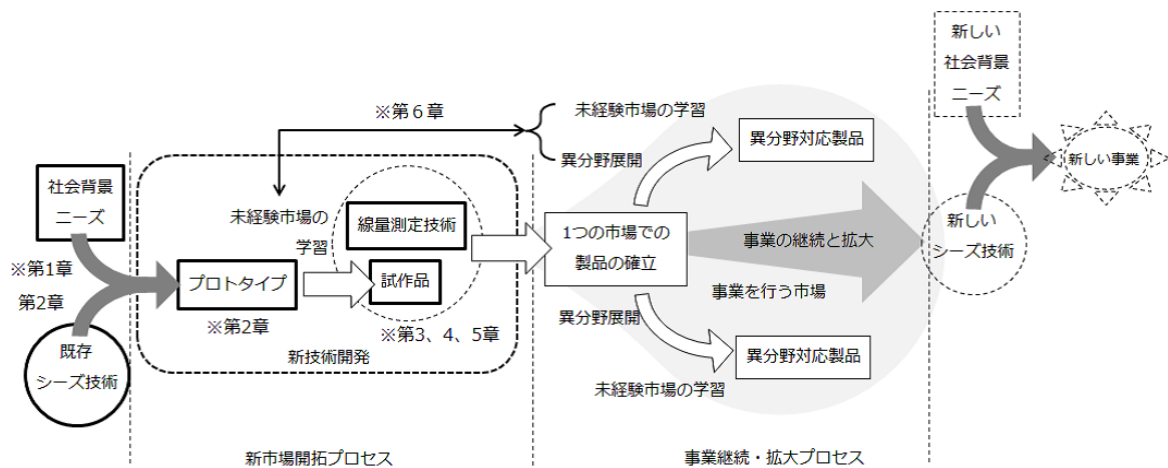


図 1.2 本研究が扱う事業プロセスと研究の対応

様々な要素技術は、こうした事業継続の過程で洗練され、自社で確立された技術シーズとなることが期待される。そして、その新しい技術シーズは未知の新しい社会的背景と融合して、ULEB 照射源販売事業が萌芽した時と同じように新規事業がスタートし、Q 社がイノベーションのサイクルを効率的に継続させていくことを目論んでいる（図 1.2）。

本章に続き、第 2 章では本研究の背後にある放射線の産業利用、特に電子線の産業利用とその技術、ULEB 照射源販売事業のコアとなる ULEB 照射源の概要を、所属企業が新規事業発案に至ったプロセスと現状を踏まえながら説明する。第 3 章、第 4 章および第 5 章は、市販のラジオクロミックフィルム線量計を利用することで、ULEB の工業応用に必要とされている数ミクロンレベルでの線量測定技術開発に関して述べる。第 3 章では、技術研究で採用した手法である、ラジオクロミックフィルム線量計を用いた線量測定の詳細を述べる。第 4 章では、高エネルギー電子線で校正した市販のラジオクロミックフィルム線量計の応答を、ULEB 線量測定に適用した実験について述べる。FWT-60 ラジオクロミックフィルム線量計の応答と吸収線量の関係を、高エネルギー電子線と基準線量計により国際標準までトレーサブルに校正した。そこで得られた応答関数を用いて、線量計に加速電圧 50 kV, 70 kV で電子線照射を行った時の吸収線量を測定し、シミュレーション結果と比較検討し、その適用性を評価した。第 5 章では、市販のラジオクロミックフィルム線量計を用いて、線量計の厚さよりも薄い領域の線量を求める手法について述べる。シミュレーションで得られた線量計内部の深度線量分布と、ラジオクロミックフィルム線量計の応答を組み合わせることで、線量計内部の深度線量分布を計算し、その結果を ULEB の加速電圧範囲で実測により検証した。第 6 章では、未経験の分野に新技術を携えた新製品を販売する新規事業を、今後継続して発展させていくために必要な製品開発プロセスについて、試作品開発のプロセスを回顧・記述することにより、今後事業を高効率で進めるための知見を得ることを目的とした分析とその成果を述べる。最後に第 7 章で本研究の結論を述べる。

第 1 章の参考文献・引用

- [1] Anthony J. Berejka, 町末男 (訳) 「アメリカにおける放射線プロセス工業利用の進展」『放射線と産業』 P6-9, **130** (2011)
- [2] 工藤久明 編著『原子力教科書 放射線利用』オーム社, P38 (2011)
- [3] A. J Berejka, and M. R. Cleland, *Industrial radiation processing with electron beams and X-rays*, in sec. 2.5, P25, IAEA (2011).
- [4] 鷺尾方一, 前川康成 監修『EB 技術を利用した材料創製と応用展開』シーエムシー出版 (2016)
- [5] 鷺尾方一 監修『低エネルギー電子線照射の技術と応用』シーエムシー出版 (2006)
- [6] 小林恒雄、イム・ラングワラ「電子線硬化とフレキシソ印刷、革新的な Wet Flex」『放射線と産業』 P13-17, **113** (2007)
- [7] 「北米並びにアジアにおける加速器の普及状況と将来展望調査報告書 概要版」社団法人日本電気工業会 加速器専門委員会 (2010)
- [8] 放射線照射振興協会 大線量測定研究委員会編『工業照射用の電子線線量計測』地人書館, P48 (1990)

第2章

本研究が対象とする主要技術とその 応用分野

第2章では、著者所属企業 Q 社が ULEB 照射源の販売事業を始めるに至った背景、および本研究が対象とする技術的課題が設定されていった過程を、放射線、電子線とその産業利用の歴史を踏まえながら述べる。

2.1 放射線とその産業利用

2.1.1 放射線とは

放射線という言葉の定義には様々な解釈があるが、広義には空間や媒質中を伝播するエネルギーの流れであり、狭義には物質を電離する能力を持つエネルギーの流れといえる。[1] 一般的には、高い運動エネルギーをもつ物質粒子（イオン、電子、中性子、陽子、中間子など）と高エネルギーの電磁波（ガンマ線、エックス線など）の総称を指すことが多い。特に、日本の法令においては、「直接あるいは間接に空気を電離する能力を持つ電磁波または粒子線」とされており、放射線が物質に対して与える影響に基づいて定義されている [2]。この放射線の物質に対する高い電離能力を利用した様々な応用技術が開発されたことで、放射線は社会と産業の発展に大きく貢献してきた一方、同じ理由により人体の健康に対しては悪影響をもたらすことも知られている。こうした二面性を持ちつつも、放射線はこれまで、学術、工業、農業、医療、その他社会の様々な分野で適切な安全管理の下で利用されてきた。

2.1.2 放射線の産業利用

放射線の物質に対する相互作用に関する研究の歴史は 1895 年にレントゲン (W.Röntgen) によりエックス線が発見され、1898 年にキュリー夫人 (M.Curie) によりラジウムが単離されてから始まった。その飛躍的な進歩はマンハッタン計画における原子炉の開発や放射線の物理・化学作用の研究によりもたらされたが、これらは軍事機密とし

て第2次世界大戦後もすぐには公表されなかった [1]。その成果は 1953 年、アイゼンハワー大統領による「Atoms for Peace」宣言により公にされ、原子炉をはじめとする放射線源が広く利用できるようになり、放射線を利用した工業技術も開発されるようになった [1]。現在に至るまで放射線の工業利用は多岐にわたり、その相互作用に応じて以下の3つに分類できる。第1は原子核の反応を利用するもので、代表的なものは原子炉（原子力発電）である。第2は放射線の高い物質透過能力を用いて、医療用画像診断や工業製品などの非破壊検査に利用するものである。第3が放射線を物質に照射することで化学変化を誘発させ、その物質の状態を改変するものであり、高分子架橋、キュアリング、滅菌などに用いられている。これら放射線の産業応用について、相互作用、利用方法で分類したものを表 2.1 に示す。本研究はこれらのうち放射線照射に関するものである。

表 2.1 放射線の産業利用の種類と例

相互作用	利用方法	利用例（方法、製品）
原子核反応	分析、治療	微量元素分析、がん治療（ホウ素捕捉）
	原子炉	原子力発電所
透過・吸収・散乱	計測制御	厚さ計、液面計、レベル計
	非破壊検査	γ (X) 線のラジオグラフィ
	イオン発生	煙感知器、蛍光灯のグロー放電管
	光の発生	自発光塗料
放射線照射	分析	蛍光 X 線分析、硫黄計
	改質	耐熱性電線、強化プラスチック、強化木材
	滅菌、殺虫、防虫	医療器具の滅菌、実験動物飼料、食品の滅菌、害虫防除
	保存	発芽防止、熟度調節
	育種	品種改良、生育調節
	治療	がん治療（重粒子線）、甲状腺治療

2.2 産業における電子線照射プロセスの概要

2.2.1 電子線照射プロセスの原理

放射線照射に用いられる放射線は、コバルト 60 などに代表される放射性同位元素から発生するガンマ線を利用するものもあるが、加速器によって生成される電子線を利用することによって大きく進展してきた。電子線照射プロセスとは、電子を物質に照射し、その電子と物質の相互作用を利用して物質の状態を改変（改質）するものである。一定以上のエネルギーをもつ電子が物質に入射すると、電子は物質内の原子・分子に励起やイオン化をもたらしながらそのエネルギーを失っていく。このプロセスに利用される電子は、改質させたい物質中の原子・分子を励起、イオン化させるためだけでなく、物質表面から改質を望む深さまで電子を侵入させるためのエネルギーが必要である。このため、電子線照射プロセスの中心となる技術は、数 100 keV から数 MeV のエネルギーの電子線を発生す

ることができる加速器技術であり、この加速器によって電子は物質内に浸透するのに十分な運動エネルギーを得て物質に照射される。加速器によって高エネルギーまで加速された電子が物質に入射すると、原子・分子の励起やイオン化が生じ、その結果としてイオン (M^+)、電子 (e^-)、励起状態 (M^*)、ラジカル ($\cdot R$) などの化学種が形成される。こうして得られた化学種は、通常反応性に富んでおり、周囲の原子・分子と相互に反応したり、新しい活性種を生じたりするが、寿命は短い [1]。このように電子線照射によって様々な化学種が生成され、それらが反応していった結果、安定な最終生成物に至る。この過程を図 2.1 に示す。

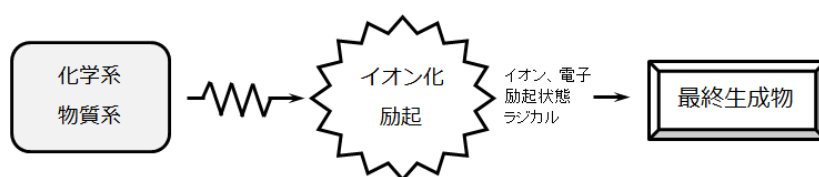


図 2.1 放射線が物質に入射した場合の化学プロセス

この最終生成物を得るための化学反応のトリガーとなるイオン化や励起を引き起こすのに、電子線はガンマ線と比較してエネルギー効率が優れている [3]。加速器技術の進歩により電子線の発生と照射量の制御技術が発達したことで、これら反応現象は容易に制御可能となり、様々な産業に応用分野が広まっていった。

2.2.2 電子線照射プロセスの歴史

電子線を物質に照射することによって物質の状態を変化させる技術は、1948 年に Dole によって放射線架橋の報告がされたことに始まる [4]。その後、電子線照射の産業応用の引き金となったのは、1952 年に Charlesby による、ポリエチレンへの電子線照射と化学架橋による耐熱性、耐溶解性向上の発見である [5]。その後 1957 年の Raychem 社によるポリエチレンの熱収縮チューブ製造、また 1960 年の General Electric 社による架橋ポリエチレン絶縁テープに始まり、その産業は幅広く進展していった [6]。

図 2.2 にこれまでに実用化された電子線照射プロセスの例を示す。1960 年代にはポリエチレンなどの架橋により耐熱電線が実用化され、同時期に熱収縮チューブ、発泡プラスチック等も開発された。耐熱電線は自動車のボンネット内の配線に使用され、高温環境における被覆の耐熱性が向上し、安全性確保に貢献している [7]。1970 年代にはラジアルタイヤの成型時の加工特性の向上に電子線架橋が用いられ始めた。現在では 90 % 以上のタイヤが放射線架橋工程を経て製造される [1]。1980 年代では放射線グラフト重合法により、高性能のボタン電池用隔膜が実用化されている [8]。また、建材用の高機能コーティング材の硬化にも利用され始めた [9]。1990 年代に入ると耐熱炭化ケイ素 [10] や創傷被覆材 [11]、また 2000 年代にはフッ素樹脂の架橋による耐摩耗性向上 [12] やグラフト重合による空気浄化フィルターや消臭液などが実用化されている [13]。また、耐環境性に優れた



図 2.2 放射線利用の歴史

電子線硬化フレキソ印刷も実用化されている [14]。このように、電子線照射によってもたらされる架橋やグラフト重合によって従来の合成、共重合では実現できない機能を高分子に付与したり、特性を向上させるこの技術が広く産業に普及し、現在まで発展をつづけている [15]。

2.2.3 電子線照射プロセスの特徴

電子線照射プロセスでは、従来技術である熱処理、紫外線処理などの処理では不可能な効果を得ることができ、プロセスの改善をもたらす技術として導入されてきた。従来技術と比較した電子線照射プロセスの長所を以下に示す。

- 厚いコート、多重層への利用が可能で、塗膜色による処理効果への影響がない。
電子線が物質へ付与するエネルギー量は、物質の密度や組成によってほぼ決まるため、電子線のエネルギーを制御することによって改質対象となる深度の制御が可能であり、紫外線や熱では処理しにくい厚さの処理も可能となる。また、電子線は特にコーティングや印刷への応用に関しては塗膜色にほぼ影響されないというメリットをもつ。
- 常温処理のため、耐熱性の低い素材でも使用できる。
熱処理は高温処理になるため、処理される材料だけでなく基材などにも耐熱性が求められ、応用範囲が限定される。電子線処理による発熱は熱処理に比べて小さく、耐熱性の低い素材やシュリンクフィルムにも使用できる。
- 重合開始剤が不要である。
重合反応に利用する場合、熱処理や紫外線処理は重合開始剤を添加する必要があるが、電子線は物質に対して直接電離作用することで反応の起点となるラジカルを生成できる。このため、高分子を合成するための重合反応を開始させるために加えられる熱開始剤・光開始剤を必要としない。EB プロセスでは開始剤が含まれていな

いため、処理した材料表面の臭気がほとんどない [16]。また、印刷後のマイグレーションを抑制できるため、食品包装用にも適したインキとされている。 [17]

- 無溶剤化

熱重合法では一般的に溶剤を使用するため、重合処理したのちに硬化が完了するまでの数日間、エージング処理により溶剤を除去する必要がある。電子線照射では、溶剤を全く必要としないプロセスも可能なため、硬化プロセスの所要時間を大幅に短縮することができる。近年では環境に対する有害物質の放出を極力低減することが求められているため、溶剤の使用は好まれない。

上記の特徴により、電子線照射プロセスは、特に印刷や滅菌などの大量生産プロセスに付随する分野においては、耐環境性（VOC、CO₂削減など）向上の有効な手段として注目され始めている [14, 18]。

2.2.4 電子線照射プロセスの種類

電子線を物質に照射することで引き起こされる反応過程は様々であるが、電子線の産業応用上の分類としては、大きく架橋、キュアリング、グラフト重合、滅菌があげられる。

架橋

架橋とは、高分子の分子鎖間に化学結合をつくることで、網目状の分子構造を形成させることである [19]。電子線架橋は、高分子へ電子線を照射することで分子鎖に反応活性種を誘起させ、分子間で新たな結合を形成させる方法である。電子線架橋の特徴は、高分子にほぼ均一な分布で架橋が起こること、架橋の密度を容易に調整できること、高分子の形状に係わらず架橋できること、高分子の純度が保存されることである。高分子は架橋によって、高温での流動性が失われるので、温度を上げて材料としての形状が保持されることになり、実用的には耐熱性が向上することになる。また、高分子のガラス転移温度を上回る温度域では、弾性率が増大し、破断時の伸びは低下する。電子線架橋は、高分子を成形加工した後に室温で架橋できることが、最大の利点である。電子線による架橋の特徴を利用した応用は数多く実用化されており、その主要なものは、電線絶縁材料の耐熱性向上、発泡ポリオレフィンの製造、熱収縮チューブの製造である。また、ハイドロゲルの特性を向上させて、創傷被覆材の製造やケイ素系高分子繊維から炭化ケイ素繊維等の製造の実用化が図られている [11]。さらに、PTFE（ポリテトラフルオロエチレン：polytetrafluoroethylene）は典型的な切断型高分子であるが、これを不活性ガス中、高温で電子線照射すると架橋が優先するということが知られており [12]、高潤滑性 PTFE 皮膜の耐久性向上に利用されている。

硬化（キュアリング）

電子線硬化（キュアリングとも呼ばれる）とは、熱硬化性樹脂の予備重合物である液状樹脂（プレポリマー、オリゴマー）が、流動性のある柔らかい状態から三次元網目構造を形成することで、強度が向上することをいう [20]。この硬化プロセスに電子線を用いることの利点は、室温でしかも短時間に反応し、高速処理が可能であることと、熱に弱い素材あるいは熱容量の大きい素材への適用が可能なことである。さらに表面あるいは必要な厚さの層だけを照射すればよいので、自己遮蔽型の低エネルギー電子加速器が一般に用いられ、エネルギー利用効率が大きく、省エネルギー的なプロセスとして成立する。また、電子線硬化型オリゴマーは、無溶剤型のため樹脂の使用量が少なく、反応時の排出物による大気汚染の恐れが非常に少ないのが特徴であり、低公害プロセスともいえる。産業用途としては、建材や紙の高機能性特殊コーティング材の硬化や、近年では電子線硬化型インキによる印刷にも利用されている [21]。

グラフト重合

電子線グラフト重合は、電子線を物質に照射することで達成される、化学的な「接ぎ木」（グラフト）の技術である [22]。ポリエチレンなどの高分子素材に放射線を照射すると C-H 結合が切れてラジカル (C·) が生成する。このラジカルが反応の活性種となり、二重結合を持つ反応液と接触すると二重結合が切れてラジカルと結合することで接ぎ木の様に枝が成長し、高分子素材が主鎖となり、グラフト重合鎖が側鎖（接ぎ木）となる。放射線グラフト重合は以下に示す特徴がある。

- 既存の成形材料への機能の付与が可能。
- 共グラフト重合や多段グラフト重合技術の応用で官能基の複合化が可能。
- 加速電圧の選択と遮蔽技術の組合せにより反応の場のコントロールが可能。
- 照射ラジカルの保存環境を制御することにより 30 日以上 of 長期保存ができるため、放射線照射工程とグラフト重合工程との分離が可能。

グラフト重合は電子線だけでなく、ガンマ線でも可能だが、電子線は照射線量率がガンマ線を利用した場合の 300 倍 から 1000 倍と高く、短時間照射が可能である [22]。また、材料への浸透深度が浅いため、搬送装置を用いて薄膜を連続的に照射する方法に適している。電子線グラフト重合を利用した技術は、ボタン電池隔膜や消臭剤、空調設備などにおける高機能フィルタ製造などに利用されている [13]。

滅菌

自然の放射線レベルに比べて非常に強力な放射線を短時間に照射された微生物は、放射線によって直接、または間接的に発生したフリーラジカルにより間接的に DNA 鎖が損傷される。その結果、細胞分裂能が著しく阻害され、一定量以上の線量が投与されると個体としての生存は不可能になり、殺滅に至る確率が高まる [23]。電子線滅菌は、このメカニ

ズムを利用することで、電子線照射によって照射試料中の微生物を滅菌する産業利用の一分野である。照射される電子線のエネルギーにより、低エネルギー電子線による表面滅菌、中エネルギー電子線による粉状または粒状製品の滅菌、高エネルギー電子線による梱包製品の滅菌に分類できる。使用する電子線のエネルギーは 10 MeV 以下であれば、被照射物の放射化の心配がない。このため、主に医療機器の滅菌等にも利用されている。電子線滅菌が、加熱や薬剤処理など他の処理法より優れている点は、その透過力が強いこと、品質劣化が少ないこと、さらに毒性物質の残留がないことにある [18]。その対象は、たとえば、エチレンオキシドのような化学薬品や（高圧蒸気による）熱処理では上記懸念が完全に拭い去れない医療機器などの滅菌である。ガンマ線照射や紫外線照射と比較した電子線照射の利点は、利用可能なエネルギー範囲が大きく、かつ、エネルギー値を自由に選定できるために、表層部の滅菌から梱包品の滅菌まで幅広い応用範囲に適用できることである。また、滅菌とは異なるが、冷凍食品や生鮮肉の食中毒菌の殺菌、香辛料や生薬の殺菌など、食品照射への応用にも 5~10 MeV の高エネルギー電子線が利用されている。

2.2.5 電子線照射施設

電子線照射プロセスは、通常電子加速器を装備した照射施設内で行われる。電子線照射施設として、電子エネルギーが 1 MeV 以上になる高エネルギー加速器を設置した場合、日本においては、放射線障害防止法に則って、使用の許認可取得が必要である。現在国内で産業において利用されている電子線照射施設の多くは、そのエネルギーが 1 MeV 以上の高エネルギー電子線を使用しているため、照射装置本体だけでなく放射線遮蔽のための設備が大規模になり、その大半が委託照射サービス会社によって運営されている。（図 2.3）このような理由から、産業用電子線照射プロセスは適用範囲が限定され、その経済規模もほとんど変化していないのが現状である [25, 26, 27]。しかし、電子エネルギーが 1 MeV に満たない加速器の場合には、法令（原子力基本法）上は放射線発生装置とは見なされない。この場合、装置の放射線防護も自己遮へい型で十分であり、照射設備や建物に特別の防護壁等は不要であることから、工業プロセス用として 2000 年 3 月現在、国内において 350 台以上が利用されている [28]。

2.3 電子線照射プロセスの低エネルギー化と ULEB 照射装置

これまで述べたように、電子線照射プロセスが産業に利用され始めて以来、主に高エネルギー電子加速器による電子線照射によって様々な放射線利用技術が開発されてきたが、工業における実用化をさらに加速させたのが、加速電圧 300 kV 以下の低エネルギー電子加速器である [29, 30, 31]。

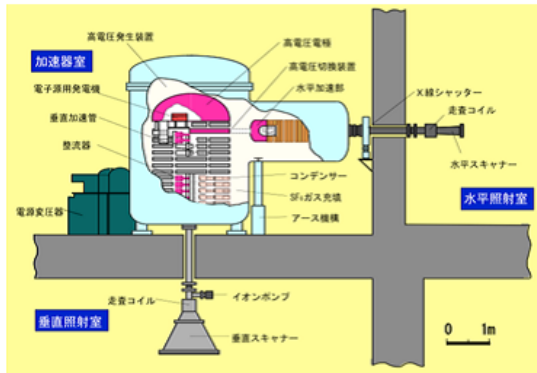


図 2.3 高エネルギー電子線照射施設 量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用技術研究所 電子加速器施設 [24]

2.3.1 電子線照射プロセスとエネルギーの関係

電子線照射において、照射される材料の表面から所望する深さまで改質したい場合には、電子線がその深さまで十分に浸透して材料内でエネルギー付与をし、望む反応を完結させなければならない。一方で、電子が物質に入射してからその運動エネルギーを失うまで物質中を移動した距離を飛程という。電子の飛程はそのエネルギーに大きく依存するが、加工したい材料の厚さや、組成、密度に応じて電子線に要求されるエネルギー範囲はほぼ決まる。現在利用されている電子線加工プロセスにおける電子線エネルギーの多くは数 100 keV から 10 MeV 程度であり、これらエネルギーの電子線が物質中でエネルギーを付与できる深さは数百 μm から数センチ程度である。電子線のエネルギー別の分類とその飛程、利用例を表 2.2 に示す。

表 2.2 電子線のエネルギーと応用例

分類	エネルギー	飛程	利用例
高エネルギー	1 MeV - 10 MeV	1 cm 以上	タイヤ、医療機器滅菌
中エネルギー	500 keV - 1 MeV	1 mm - 1 cm	発泡ポリウレタン、耐熱電線架橋
低エネルギー	100 keV - 500 keV	100 μm - 1 mm	コーティング硬化
超低エネルギー	100 keV 以下	100 μm 以下	印刷用インキ、表面改質

一方で、近年の産業分野においては、材料の表面数十 μm 以下の厚さで加工したいというニーズが急速に広まってきている。その用途は印刷用インキの乾燥や、機能性を付与するためのごく薄いコーティング層の生成、または材料の最表面層のみの改質など様々である。また、そのニーズは電子線照射を基点とする化学反応プロセス (架橋、重合) 自体による新材料創成である場合も多いが、現状用いている熱処理工程や紫外線処理工程を、耐環境性や生産コストを改善させることができる電子線加工プロセスに置き換えるというも

のもある。

このような薄膜加工分野においても、その多くは従来用いられてきた高エネルギー電子線を適用し、求められる化学プロセスを完結させることは原理的に可能である。これら工程で求められる効果指標となるものは、改質される材料の深さ位置での吸収線量であり、この吸収線量が満たされてさえいれば、照射された電子線のエネルギーに対する依存性はない場合がほとんどだからである [32]。加速器から照射された 1 次電子は材料内で多数の 2 次電子を生成するが、実際にイオン化や励起反応に寄与するのがこの 2 次電子である。最初に物質に入射する 1 次電子のエネルギーは、透過力と発生 2 次電子の数とその空間分布にこそ影響を及ぼすものの、入射する 1 次電子のエネルギーによって誘起されるイオン化や励起反応の本質が変わるわけではない。したがって、エネルギーが高い電子線装置と低い電子線装置で、化学反応の中身に本質的な差は無い [6]。

しかしながら、改質深さとして数十 μm 以下を対象とする処理の場合、従来の高エネルギー電子線加工プロセスを採用するにはいくつかのデメリットがある。一つは放射線遮蔽を含めた装置の規模（装置サイズ、重量）である。電子線はそれ自体が放射線であることに加え、その電子線が物質（被照射物や照射雰囲気ガス）と相互作用することで制動エックス線を発生させる。この制動エックス線を遮蔽し、作業者の被曝を防ぐためには装置周辺に放射線遮蔽構造が必要であり、このためには電子線のエネルギーが高くなるにつれて高比重の材料、または厚い遮蔽材が必要になる。結果として電子線照射源本体を含め、加工プロセスの生産設備が大掛かりなものになるため、初期費用、維持費用が大きくなる。もう一つのデメリットは、高エネルギー電子線の物質中における高い透過率であり、このことが電子線をごく表面層だけに照射することを求められる場合には問題となる。薄膜加工プロセスは表面の数十 μm 以下（場合によっては数 μm 以下）のみの改質が要求される。この場合、材料深部や基材には改質を必要とされずにむしろ、元来の改質されない状態での特性を求められる場合がある。また、改質されるコーティングなどが塗布された基材が、放射線劣化などの理由により電子線を当てたくないという場合もある。以上の理由より、電子線加工プロセスを薄膜処理の分野に普及させるためには、そのプロセス（加工したい厚さ）に適した電子線エネルギーを有する電子線照射源が求められる。特に表面数十 μm 以下の改質が要求されるプロセスにおいて、それは加速電圧 100 kV 以下の ULEB 照射源である。

2.3.2 工業用 ULEB 照射プロセス

ULEB 照射において、そのエネルギー付与特性が加工プロセスにもたらす特徴を、従来の高エネルギー電子線加工プロセスと比較しながら具体的に述べる。

- 電子のエネルギーと物質中へのエネルギー付与特性

まず電子線照射時における、物質の深さに対するエネルギー付与量をモンテカルロシミュレーションを用いて計算し、1 次電子のエネルギー別に比較した結果を図 2.4 に示す。

横軸は比重 1 の水に相当する電子線照射軸方向の深さである。縦軸は、1 個の電子が水中

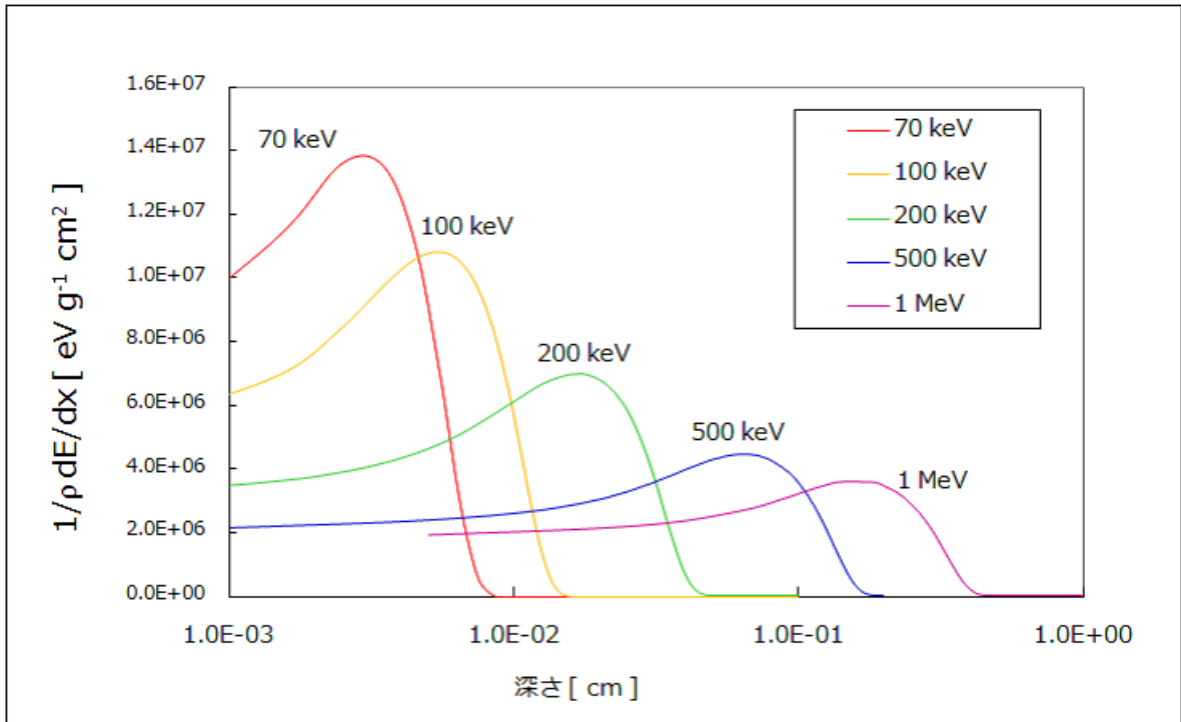


図 2.4 水中における電子のエネルギー別阻止能

の各深さ位置（横軸）において水に付与するエネルギー量を、水の単位厚さあたり [cm] に換算し、密度 [g/cm³] で除した量である。1 次電子のエネルギーが低くなるにつれて、照射される材料にエネルギーを付与できる深さは浅くなるが、表面付近のエネルギー付与量は高エネルギーのそれよりも大きくなる。すなわち、表面からある深さまで材料を改質したい場合には、その改質を所望する深さに応じて最もエネルギー付与効率が良い電子線エネルギーを選択することが重要である。これが適切でない場合には望む改質レベルが効率的に達成されないばかりか、材料深部や基材などの望まない部分へ電子線のエネルギーが付与されてしまうため、望まない改質・劣化が引き起こされる（図 2.5）。

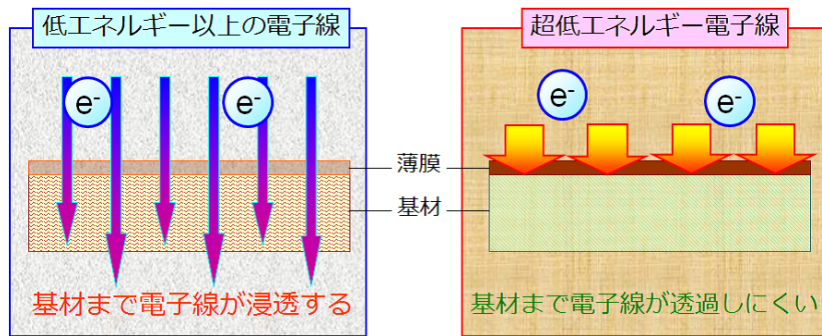


図 2.5 電子エネルギーの違いによる照射される材質への浸透度

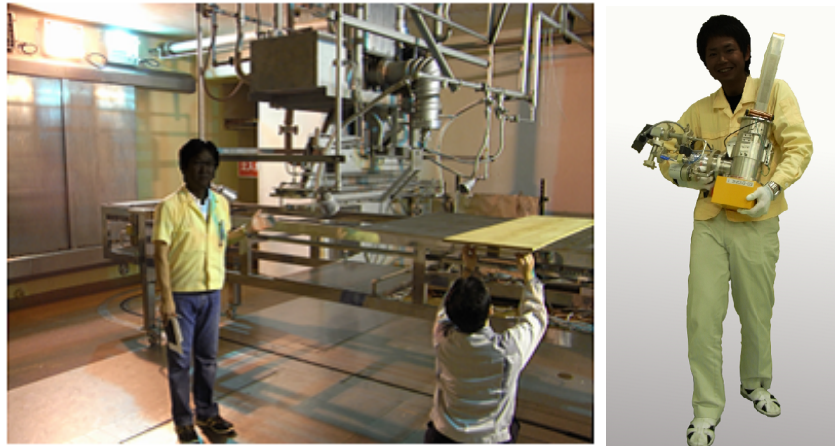


図 2.6 左：高エネルギー電子線照射施設（高崎量子応用技術研究所）、右：産業用 ULEB 照射源

2.3.3 電子線の低エネルギー化が工業利用分野にもたらす利点

薄膜用電子線加工プロセスにおいて、電子線の低エネルギー化は従来の高エネルギー照射設備によるプロセスと比較して多くのメリットをもたらす。

- 電子線照射源の小型化

材料改質深度にあわせて電子線の加速電圧を可能な限り低く最適化することにより、照射源本体の高電圧印加に関連する部材および構造が小型かつ簡素化される。電子線照射源が小型化されることにより、処理設備も小型になり、現状の生産ラインへの軽微な追加・改造のみで電子線加工プロセスを導入することが可能になる。図 2.6 は従来の高エネルギー電子線照射装置と、ULEB 照射源本体の大きさを比較したものである。

- 放射線遮蔽の簡素化

電子線照射源から照射された電子線は、改質材料などの物質と相互作用する過程で制動エックス線を発生する。電子線照射源の低加速電圧化は、必要としない部分に電子線が照射されることが抑制されることによって、必然的に制動エックス線の発生量自体が抑制できると同時に、制動エックス線の低エネルギー化をもたらす。電子線照射設備の遮蔽は、ほぼ制動エックス線の漏洩を防止するために設計されるため、電子線照射源の低加速電圧化の結果としてもたらされる制動エックス線の低エネルギー化は、装置だけでなくプロセス全体の放射線遮蔽の簡素化を実現する。例として、管電圧 150 kV と 70 kV の電子線照射源を想定した場合の必要な遮蔽厚さを、医療用のエックス線管の遮蔽計算用のデータを利用して計算した [33]。計算は、労働基準法に則った作業条件で稼動した場合、装置外表面における漏洩線量が、電離放射線障害防止規則で定められる管理区域設定基準「1.3 mSv/3 ヶ月」を超えないようすることを想定して行った。管電流 1 mA、エックス線管焦点から遮

蔽体表面までの距離 50 cm とした場合、従来低エネルギーとされている管電圧 150 kV の場合では、鉄のみで遮蔽しようとする 85 mm 程度の厚さが必要となり、現実的には鉛を用いる必要がある。一方、同条件における管電圧 70 kV では 18 mm 程度で遮蔽が可能になるため、環境問題で使用が制限されつつある鉛は必ずしも必要とされない。先に述べた装置自体の小型化との相乗効果により、照射設備自体が大幅に小型軽量化でき、新規設計する場合だけでなく既存生産設備への導入に必要な装置サイズの条件を満たせる可能性が高くなる。

- **改質が必要な部分に集中してエネルギーを付与できる**

改質を完了できる線量を確保しつつ電子線加速電圧を低く最適化することは、改質を望まない領域（材料の深部や基材など）に付与されるエネルギーを大幅に低減させることができる。このため、電子線照射されない（電子線からエネルギー付与がほとんどない）部分は本来の材料特性を維持しやすくなる。また、改質対象物を透過したり、照射雰囲気中で散乱した電子線のエネルギーは最終的に装置内で吸収されて、ほぼすべてが熱に変換される。この発熱による材料および装置周辺部材への悪影響や、それらを防止するための放熱処理のコストを軽減できる。さらに、電子線や2次的に発生するエックス線、オゾンなどによる装置部材（主に放射線に弱い樹脂系の材料等）の劣化なども軽減できる。70 keV 電子線の空気中の飛程は約 30 mm 程度であるため、出射窓と加工物表面の間以外への電子線が散乱する領域は高エネルギー電子線に比べて大幅に狭くなる。このため、電子線照射に起因する装置内の部材劣化の懸念が軽減されることが期待できる。上記のように、望まない部分へのエネルギー付与が減少することはすなわちエネルギー効率の良いプロセスが達成されるということである。処理スピードの向上に伴う生産性の向上だけでなく、電子線照射に要する電力コストの削減にも貢献できる。図 2.7 に電子線照射プロセス時における電子線から物質へのエネルギー付与構造を示す。

2.3.4 ULEB 照射源の開発背景と工業利用の現状

ここまで解説してきた電子線の低エネルギー化によるメリットを実現するための ULEB 照射源の開発過程と製品の特徴について述べる。

ULEB 照射源開発当時の技術課題

工業利用されている一般的な電子線照射源は、真空管中で加熱されたフィラメントから放出される熱電子を高電圧印加された電極間で加速し、大気と隔絶する電子線出射窓を通して大気中へ放出する。ULEB 照射源の実現において最も重要な開発要素の一つがこの電子線出射窓である。電子線出射窓に求められる要件は、低エネルギーの電子線を高効率

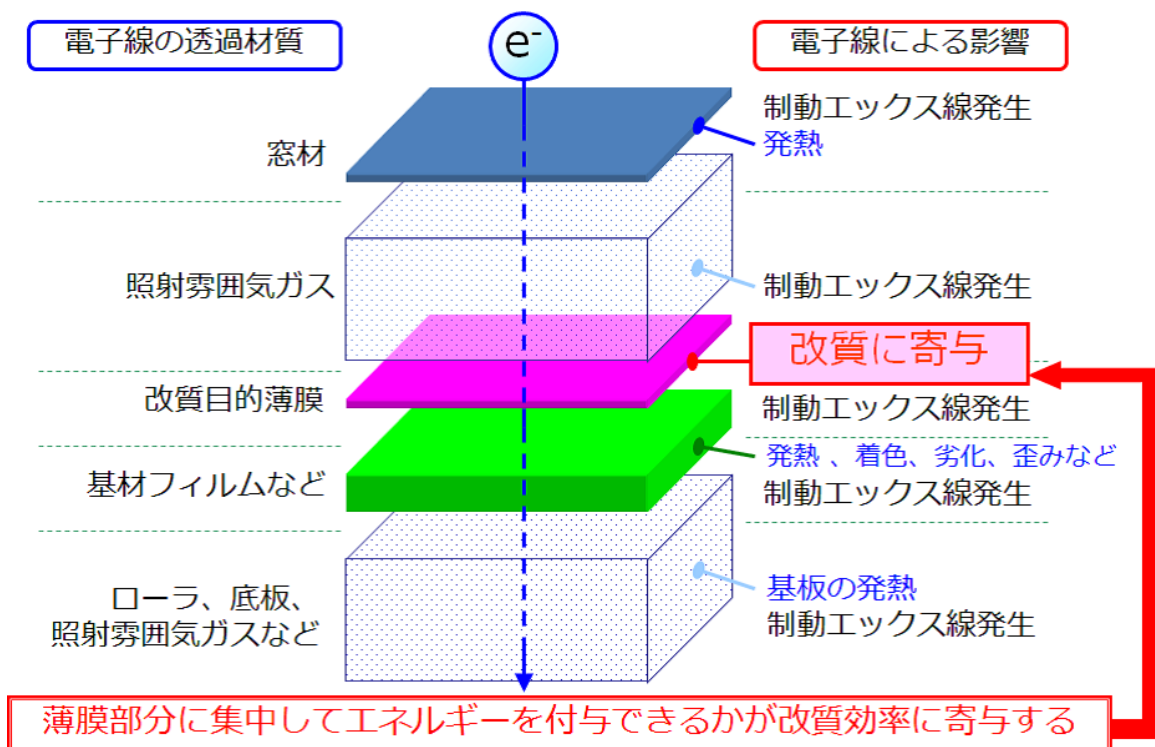


図 2.7 典型的な工業用 ULEB プロセスにおけるエネルギー付与構造

で透過させられる薄さと低密度、電子線透過時に電子線出射窓自体で発生する熱に対する耐久性、ほぼ 1 気圧の圧力を受けた状態で自立できる機械的堅牢性、電子線照射の際に発生するオゾン・エックス線に対する耐腐食性、材料への電子線照射により、その材料から発生するガス等に耐性があること、などの条件を兼ね備えていることが求められる。

特に 70 keV 以下の電子線を効率よく透過させ、工業用プロセスにおいて実用的な照射量を確保するためには、軽金属の薄膜を採用する場合、数 μm から十数 μm 程度の非常に薄い膜が求められる。膜が薄くなることで、一般的に膜の平面方向の熱伝導性は悪くなり、電子線透過時の発熱による温度上昇に起因する物性変化や大気側での化学反応による劣化・脆化のおそれがある。また機械的強度が下がり、大気と真空を安定して隔絶するための強度を保ちにくくなる。さらに生産設備として対応できる幅広い電子線照射面積を確保するために電子線出射窓は広く開口している必要があり、このことも真空封止時の電子線出射窓内部に発生する応力と機械的構造の耐久性に対する負荷を増大させる原因になる。従って、ULEB を効率良く透過させる薄い膜でいかに大きな開口部を真空封止し、耐熱性と耐腐食性を備えて長時間安定して照射可能な電子線出射窓を開発（材料選択、構造設計）できるかが、ULEB 照射装置における技術開発の主要課題となる。さらに、電子線照射源の管内は真空にする必要がある。低加速電圧とはいえ、電子加速用の電極間には数万ボルトを印加するため、管内の清浄度や電極表面の仕上がり状態により、高電圧印加時に内部放電等を引き起こす要因になる。

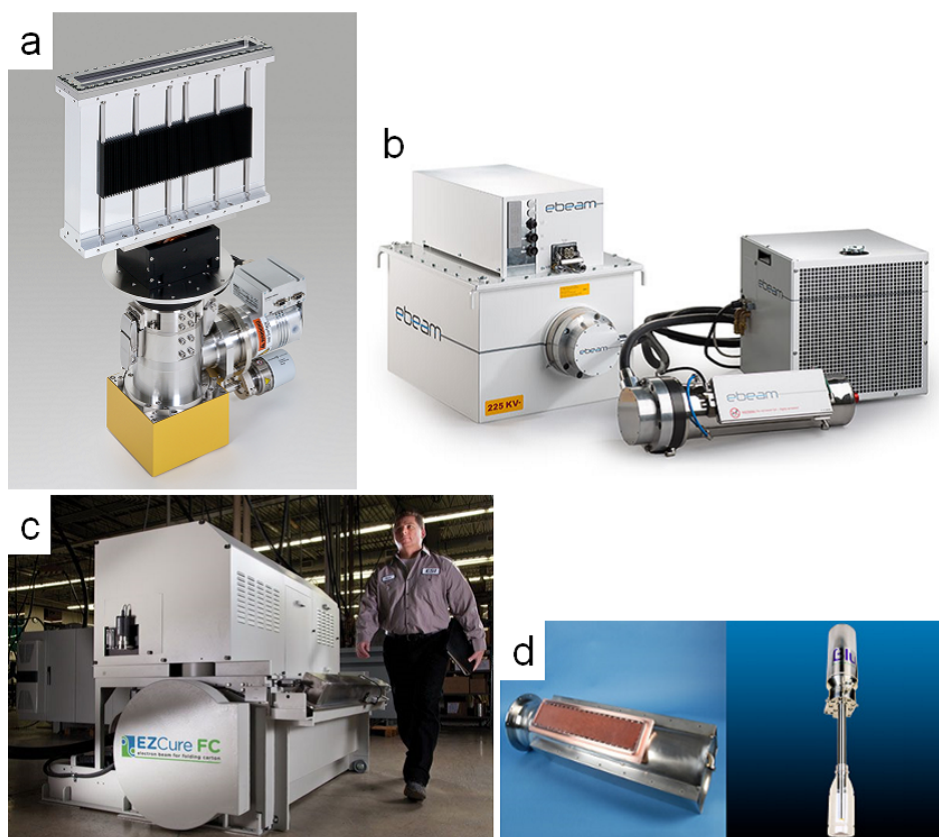


図 2.8 工業用に開発された ULEB 照射源 a : 浜松ホトニクス株式会社製 EB-ENGINE[37]、b : e-beam technology 社製 ebeam-engine[38]、c : Energy Sciences Inc. 製 Ez-cure[39]、d : 日立造船製 PET ボトル滅菌用電子線照射源 [40]

ULEB 照射源の工業利用の現状

2000 年代以降、このような技術課題をクリアした ULEB 照射源が開発され、工業利用され始めている。その主なものを表 2.3 にまとめた。公開されているその主な用途は印刷用インキ乾燥 [39] や医薬品・飲料容器の表面滅菌 [34, 35, 36] が中心である。しかし、ULEB 照射源は、日本国内ではその設置設備の放射線遮蔽能力が一定の基準を満たせば、労働基準監督署長への届出のみで設置運用が可能になるため、その利用実績は公的な調査によって明るみならず、公開されていない用途も多くあると考えられる。

表 2.3 産業用に開発された ULEB 照射源

メーカー	製品名	最低加速電圧	特長、用途など
浜松ホトニクス株式会社	EB-ENGINE	50 kV	開放型
e-beam technology	ebeam-engines	70 kV	密封型
Energy Sciences Inc.	EZ cure	70 kV	高速インライン用大出力
日立造船株式会社	ITB/OTB	80 kV	PET ボトル滅菌用

これまで述べたように ULEB 照射プロセスには数多くの利点があり、その工業利用を目指して製品開発も盛んに行われてきた。その結果、架橋、キュアリング（印刷など）、滅

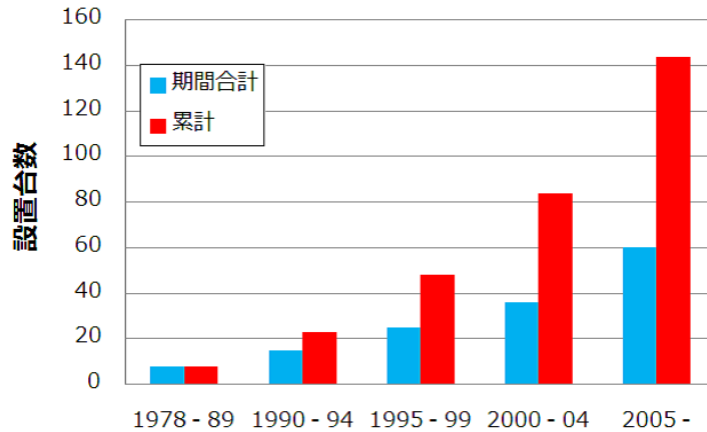


図 2.9 工業用電子線照射装置の設置台数推移 [41]

菌分野においては ULEB 照射プロセスが拡大しつつある [29, 30, 31]。

2.4 ULEB 照射源の応用が期待される市場規模

放射線産業利用の経済規模についての統計調査が平成 19 年に実施されている [26]。ここではエネルギー利用と、放射線利用にわけられ、放射線利用はアイソトープによる照射とそれ以外にわけられ、電子線照射装置は加速器として捉えられている。世界の加速器市場は、あらゆる分野において年々拡大の一途を辿っている。加速器装置の年間の成長率は約 10 %と言われており、いまやグローバルレベルでの重要な産業として位置づけられるようになってきている [41]。図 2.9 に工業用電子線照射装置の設置台数推移を、表 2.4 に、世界の加速器装置の 2008 年時における累計設置台数と年間販売台数及び年間販売金額を示す。

表 2.4 世界の工業用加速器装置の年間販売台数と設置台数 [41] (2008 年、単位：台、百万ドル)

用途	累計設置台数	年間販売台数 (2008 年)	年間販売金額 (2008 年)
イオン注入装置	10,000	500	1,400
電子線、エックス線照射装置	2075	75(1 MeV 未満 50、1 MeV 以上 20)	130
イオンビーム分析装置 (AMS 含む)	225	25	30
非破壊検査装置	750	100	70

加速器の需要分野は工業応用と医療応用に大別され、工業用加速器応用装置の累計設置台数は 13,050 台、2008 年単年度の販売台数は 700 台となっている。用途別では主に半導体加工用として使用されるイオン注入装置が累計で 1 万台、2008 年が 500 台と圧倒的に多い。金額ベースでも年間 14 億ドルと、大きな市場を形成している。電子線、X 線照射装置は、累計は 2,075 台、2008 年単年度が 75 台の販売である。75 台の内訳は、1MeV 以上が 20 台、1MeV 未満が 50 台となっている。以下に文献 [41] に基づいた加速器の需要分野別現状と将来展望を述べる。

工業用

工業分野の存在は医療分野と並ぶ規模であり、各国においてはこの工業利用により加速器が普及拡大してきたと言っても過言でない。特にイオン注入装置や電子線装置などで普及が進んでいる。特に米国は、自動車産業を中心に工業用の電子線装置が最も普及している国である。工業用の電子線照射装置も、世界市場 2075 台の約 1/3、650 台ほどが米国内で稼動中である [41]。また米国では小型電子線装置を利用した塗料キュアリングも積極的に行なわれており、建材などでも需要がある。今後は自動車産業の方向性が加速器の新規需要に与える影響が大きいと思われるが、次世代自動車や、航空宇宙、風力発電システム向けの新素材の加工などでも需要拡大が見込まれる。

中国における放射線の応用は古く、1950 年～1960 年代から徐々にはじまり、1980 年代には農業分野における放射線育種や高分子材料の改質などで市場は拡大し、今後は熱収縮チューブや電線ケーブル等の既存の主要な需要分野が中国経済の発展に伴い、引き続き大幅に拡大していくことが予想される。また、韓国など海外メーカーの中国への生産拠点の移設も増えていくと考えられ、自動車産業の発展や原子力発電所の増設による電線ケーブルの需要増加により、同国での加速器のさらなる普及が考えられる。中国だけでなく、インドを始めその他アジア諸国・地域については、自動車産業などが発展していく中で需要の拡大が期待されている。

滅菌・殺菌

加速器の応用分野として滅菌の需要は今後高まっていくと考えられている [41]。電子線滅菌の主な用途としては、医療機器及び医薬品の滅菌が主流であるが、その他食品・飲料容器や実験用器具など多岐にわたる。今後の加速器の市場拡大において、医療機器及び医薬品の滅菌は世界的に非常に有望な需要分野であると考えられており、主に以下の 3 点によって今後の発展が期待される。

- 医療機器や医薬品などの照射対象物の増加
- 競合技術からの切り替え
- 照射装置の多様化

照射対象物の増加においては、医療及び医薬品産業の発展に伴い、ディスプレイ製品や医薬品の生産量が増加することで滅菌のニーズが必然的に増大していくと考えられる一方で、電子線滅菌の競合技術であるガンマ線やエチレンガス、もしくは高圧蒸気滅菌から電子線滅菌への切り替えの動向がポイントになるとされている。

国別に見てみると、米国では医療機器及び医薬品産業は、自動車産業の代替ともなり得るような基幹産業として発展していくと期待されている。また、照射対象物として、新たに医薬品や医療機器、もしくはバイオ製品の組み合わせ製品であるコンビネーションプロダクトも注目されてきており、米国政府もワクチンの開発などに力を入れる方針とされている [41]。この分野では、受託加工企業の存在が大きく、その受託加工企業がガンマ線滅

菌に力を入れている点が、加速器普及における課題となっている。しかしその一方で、最近の傾向として高エネルギー電子線を利用して最終滅菌を行なう既存方法の代替として、低エネルギー電子線装置を無菌充填システムの一部として利用するケースが増えてきている。小型電子線装置に関しては、特に医薬品メーカーへの導入が期待される。

中国においても、今まではやはりガンマ線を中心に滅菌が行なわれてきたが、近年では、電子線装置を利用した受託加工企業もでてきており、今後はガンマ線の代替としていかに電子線装置を普及させていくかがポイントとされている。また、中国では、漢方などの医薬品のニーズも大きく、日本など海外の医療メーカーが中国に生産拠点を設け、現地で放射線滅菌をしているケースも増えてきている [41]。その他アジア諸国・地域に関しては、中国同様、輸出用の医療機器の増加に伴い滅菌の需要は拡大傾向にある。日本も含めた諸外国の医薬品メーカーによる現地法人の設立が加速していくことで、需要は確実に高まっていくことが期待されている。特に日本メーカーの場合、マスクや医療用チューブ、ラテックス手袋など、比較的構造がシンプルなディスポーザブル製品を、中国もしくは東南アジア諸国で生産しており、これらはガンマ線による滅菌が主流となっているが、電子線による滅菌も普及していくことが期待されている。

食品・飲料容器

先述した米国における小型電子線装置を利用した無菌充填システムの普及により、その波及効果として食品包装容器や、ペットボトル及びキャップなどの飲料容器の滅菌としての電子線装置の市場拡大が期待されている。食品包装容器には、フィルム、BIB（バックインボックス：食料原料の輸送用容器で、小売店向けの業務用ソフトクリームなどに使用するプラスチック容器）の他、バター、クリーム、油脂等の容器、ハム用綿糸、飲料用のコルクなど多様である。同分野でもガンマ線滅菌の代替として、小型電子線装置による電子線滅菌の普及の動きがある。

その他

その他滅菌の需要としては、実験用器具や羽毛及び関連製品、化粧品容器及び原料・用具、雑貨類などがある。これら用途は現在、ガンマ線による滅菌が主流となっていることが多く、今後の電子線滅菌への切り替えの動向が注目される。米国では、鳥インフルエンザの影響から輸入羽毛や羽毛を利用したソファを始めとした家具や羽毛布団、枕等の寝具への滅菌の需要も拡大してきている。韓国では、化粧品容器以外にも化粧品原料やブラシなど、化粧用具もガンマ線滅菌ではあるが行なわれている。化粧品原料に関しては、天然由来の原料への滅菌のニーズが大きい。また、中国では、ぬいぐるみや雑貨類の滅菌のニーズも消費者側からの要望により高まってきている。特にアジアでは医薬品として利用されるハーブ類の滅菌市場も重要になりつつある [41]。

ULEB 照射プロセスの基本原理は、アイソトープからのガンマ線や高エネルギー電子線により開発されたものが多い。そのプロセスに求められる処理厚さが薄膜化することで、

これらの応用が ULEB に適用され始めているといえる。上述した世界的な加速器市場の発展の過程と現在の動向はすなわち、今後の ULEB 照射源市場の発展を示唆するものであるといえるだろう。ULEB 照射源に今後予想される市場分野としては、印刷用インキ、表面コーティングの乾燥、表面改質、表面滅菌などである。印刷用インキの硬化設備の市場規模は世界で年間 1000 億円であり、そのうち現在 EB 印刷が普及しつつあるフレキシ印刷分野での市場は 700 億円である。また、表面滅菌においても、電子線滅菌設備の世界市場規模は 1300 億円と予想されている。

2.5 ULEB 照射源の普及に向けた課題

ULEB 照射源には多くの産業応用と市場が見込まれている一方で、今後の産業普及を加速させるためには幾つかの課題もある。それら課題としては、以下の 4 点が挙げられる。

1. 従来技術・プロセスからの置き換えにあたって、装置開発だけでなく電子線処理に適した材料開発が必要。
2. UV や熱加工と比べて初期導入コストが高い。
3. 放射線処理に対する抵抗・敷居の高さ
4. 80 keV 以下の電子線に対して、厚さ数 μm レベルの線量を評価するための線量測定技術が未開発。

本研究はこの課題を解決するために、技術研究課題として ULEB 線量測定技術の開発を設定した。次章ではその導入として、電子線線量測定について述べる。

第 2 章の参考文献・引用

- [1] 工藤久明 編著『原子力教科書 放射線利用』オーム社 (2011)
- [2] 原子力基本法 (昭和三十年十二月十九日法律第百八十六号) 「第三条第五号」
- [3] 幕内恵三『ポリマーの放射線加工』ポリマーダイジェスト (2005)
- [4] Dole, M., and D. Rose. *Effect of radiation on colloidal and high polymeric substances,*” *Symposium IV, Technical Command.* paper presented at the 114th Meeting of the American Chemical Society, Portland, Oregon, 1948; see also M. Dole, US Army Chemical Center, Maryland (1950)
- [5] Charlesby, Arthur. *Cross-linking of polythene by pile radiation.* Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. Vol. **215**, No. 1121. The Royal Society (1952)
- [6] 鷲尾方一監修『低エネルギー電子線照射の技術と応用』シーエムシー出版 (2006)
- [7] 早味宏「電線ケーブル等の高分子製品への電子線利用」『放射線と産業』 4-8, **113** (2007)
- [8] Y. Okumura, *Expansion of Industrial Use of Electron Beam Processing System,* J. Vac. Soc. Jpn. Vol. **60**, No.2 (2017)
- [9] 石田和博「低エネルギー電子線硬化法の動向」『熱硬化性樹脂』 Vol.7 No.1 P25-33 (1986)
- [10] Kameda, Tsuneji, and Shoko SUYAMA. *Development of continuous SiC fiber-reinforced reaction sintered SiC matrix composite.* Journal of the Ceramic Society of Japan **107**, 1244: P327-334 (1999)
- [11] 磯部一樹「電子線によるハイドロゲル創傷被覆材の創製」『放射線と産業』 No.**113**, P9-12 (2007)
- [12] Oshima, Akihiro, et al. *Radiation induced crosslinking of polytetrafluoroethylene.* Radiation Physics and Chemistry **45.2**, P269-273 (1995)
- [13] 藤原邦夫「電子線グラフト重合を利用した新製品の開発」『放射線と産業』 No.**113**,P18-21 (2007)
- [14] 小林恒雄、イム・ラングワラ「電子線硬化とフレキシソ印刷、革新的な Wet Flex」『放射線と産業』 No.**113**, P13-17 (2007)
- [15] A. J Berejka, and M. R. Cleland, *Industrial radiation processing with electron*

- beams and X-rays*, in sec. 2.5, P25, IAEA (2011).
- [16] 武井太郎「低エネルギー型 EB 装置の最新利用状況」『放射線と産業』 No.120, P40-44 (2008)
- [17] 「軟包装における EB オフセット印刷と付加価値を高める後加工」印刷学会 2016 冬期セミナー資料 (2016) http://www.nihon-s-and-h.co.jp/news/Winter_seminar2016_0229.pdf 最終アクセス日: 2017/10/30
- [18] 山瀬豊「電子線滅菌の現状と今後について」『放射線と産業』 No.113, P22-25 (2007)
- [19] 放射線利用技術データベース, データ番号:010011, 「放射線架橋」<http://www.rada.or.jp/database/home4/normal/ht-docs/member/synopsis/010011.html>, 最終アクセス日:2017/10/11
- [20] 原子力百科事典 ATOMICA 原子力用語辞書「電子線硬化」http://www.rist.or.jp/atomica//dic/dic_detail.php?Dic_Key=1409 最終アクセス日:2017/10/11
- [21] 放射線利用技術データベース, データ番号: 010317, 「電子線硬化によるフレキシソ印刷用インキ」<http://www.rada.or.jp/database/home4/normal/ht-docs/member/detail/010317.html>
- [22] 放射線利用技術データベース, データ番号: 010013, 「放射線グラフト重合」<http://www.rada.or.jp/database/home4/normal/ht-docs/member/synopsis/010013.html>, 最終アクセス日:2017/10/11
- [23] 飯田博美『放射線概論』第5版通商産業研究社, ISBN 4924460745 (2001)
- [24] 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 量子ビーム研究部門 高崎量子応用研究所ホームページ http://www.taka.qst.go.jp/tiara/665/index_acc.php 最終アクセス日:2017/10/30
- [25] 柳澤和章、久米民和、幕内恵三「放射線利用分野の経済規模」『RADIOISOTOPES』 **50**, P581-590 (2001)
- [26] 「平成 19 年度 放射線利用の経済規模に関する調査報告書—要約版— (内閣府委託事業)」独立行政法人 日本原子力研究開発機構 (2007)
- [27] 柳澤和章「我が国の放射線利用分野の経済規模について」『RADIOISOTOPES』 **60**, P189-201 (2011)
- [28] 「RI、放射線の利用状況」『原子力年鑑 2006』原子力産業会議, (2005)
- [29] K. P. Felis, T. Avnery, and A. J Berejka, *Radiat. Phys. Chem.* **63**, 605 (2002).
- [30] W. Scharf, and W. Wieszczycka, *Electron accelerators for industrial processing—a review*, AIP Conf. Proc. **475**, 949 (1999).
- [31] A. J Berejka, *Prospects and challenges for the industrial use of electron beam accelerators*, in proceedings of International Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators, IAEA (2009)
- [32] 鷲尾方一, 前川康成 監修『EB 技術を利用した材料創製と応用展開』シーエムシー出版 (2016)
- [33] 『医療放射線管理の実践マニュアル』日本アイソトープ協会 (2004)

- [34] *Trends in radiation sterilization of health care products.* — Vienna : International Atomic Energy Agency, (2008)
- [35] Didier MORISSEAU. *NEW APPLICATIONS FOR. ACCELERATORS. IN PHARMACEUTICAL PROCESSES.* IAEA International Topical Meeting on Nuclear Research. Applications and Utilization of Accelerators. VIENNA May (2009)
- [36] I. Sakai, *Low Energy Electron Beam Sterilization Process for Plastic Drink Containers*, J. Vac. Soc. Jpn. Vol. **60**, No.2 (2017)
- [37] 浜松ホトニクス株式会社ホームページ : <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/L12978.html> 最終アクセス日:2017/10/27
- [38] e-beam technology Inc. ホームページ : <http://ebeamtechnologies.com/products/ebeam-engines/> 最終アクセス日:2017/10/27
- [39] Energy Sciences Inc. ホームページ: <https://www.ebeam.com/ezcurefc> 最終アクセス日:2017/10/27
- [40] 日立造船株式会社ホームページ : <http://www.hitachizosen.co.jp/csr/hitz/life06.html> 最終アクセス日:2017/10/27
- [41] 「北米並びにアジアにおける加速器の普及状況と将来展望調査報告書 概要版」社団法人日本電気工業会 加速器専門委員会 (2010)

第3章

電子線の線量測定技術

3.1 第3章の概要

本章では電子線の工業利用において重要な役割を担う、線量測定技術について述べる。工業用電子線照射プロセスでは、照射される材料の品質管理のために電子線照射される材料の吸収線量 (単位: Gy [J/kg]) の測定が重要である。従来、測定可能な吸収線量範囲の広さと取扱い易さから、化学線量計であるラジオクロミックフィルム線量計が工業利用の現場で広く利用されている。本研究では、Far West Technology Inc. (FWT 社) の FWT-60 ラジオクロミックフィルム線量計を利用する。FWT-60 ラジオクロミックフィルム線量計は、その厚さが 11 μm のものがあり、市販されているラジオクロミックフィルム線量計の中ではその厚さが最も薄いものの一つであるため、ULEB 線量測定に適している。しかし ULEB の物理的特性により、この FWT-60 線量計を用いても、工業用 ULEB プロセスに求められる材料表面数ミクロンレベルの吸収線量を直接得ることはできない [1]。本章では、まず電子線線量測定技術および、本研究で採用した FWT 社の線量測定システムについて述べた後、それらを ULEB 線量測定に適用するうえでの課題を取り上げながら、第4章、および第5章で取組む ULEB 線量測定技術開発に至った背景を述べる。

3.2 電子線吸収線量の測定

3.2.1 吸収線量と線量計

放射線が物質と相互作用したときの物理量を正しく測定することは、放射線取扱いの安全面だけでなく、放射線照射プロセスによって生産、管理される品質の面においても重要である。実用上幅広く利用されている放射線の線量を表す単位には、照射線量、吸収線量、等価線量があり、これらのうち、放射線プロセスの品質管理において重要な役割を果たすのは吸収線量である。吸収線量は、放射線が照射される物質に与えられるエネルギー量を、物質の種類を問わずに表現できる単位であり、1 kg の質量に 1 J のエネルギーが与

えられるとき、1 Gy（グレイ）である。工業用電子線照射プロセスにおいて、放射線が照射された材料などに起こる効果は、この吸収線量と密接に関連している。電子線照射による滅菌や高分子加工などにおける工程管理の面からも、所望する照射効果を達成する放射線照射条件の制御のための尺度として、吸収線量の測定は不可欠である。

吸収線量を測定するための手段は、その目的に応じてさまざまな原理・技術が応用されている。吸収線量は、その定義から、照射された材料の単位質量当たり付与されたエネルギー量 [J/kg] を知ることが出来れば決定できる。放射線照射される材料は、照射によって様々な物理・化学的作用が材料内部で引き起こされるが、照射によって所望する効果と吸収エネルギー量が一對一で明確に対応がつかないのであれば、照射によって誘起される放射線効果の度合いからその材料の吸収線量評価をすることが可能になる。工業用電子線照射プロセスにおいて照射される材料の吸収線量は数 kGy から数 MGy と非常に高く、かつ電子線はエックス線やガンマ線と比較して物質へのエネルギー付与密度が高い。この、高線量かつ高密度である吸収線量を測定することができるのは主に化学線量計と呼ばれる種類のものである。化学線量計における放射線効果と、それを応用した線量計としては、以下のものがある [2]。

1. 水溶液中の酸化還元反応：フリッケ線量計、セリウム線量計
2. 着色：ラジオクロミックフィルム、PMMA 線量計
3. 発光：TLD(Thermo Luminescence Dosimeter)
4. 退色：ブルーセロファン
5. ラジカル形成：アラニン、テフロン

3.2.2 工業用電子線照射プロセスにおける吸収線量測定

工業用電子線照射プロセスにおいて、吸収線量測定の果たす役割は非常に大きい。プロセスで生産される製品の品質を管理するためには、照射される製品材料に目的の照射効果を引き起こすのに必要な最小の閾値線量や、製品自身の性能を損なわないために許容できる最大線量値を知る必要がある。このために、照射される材料の吸収線量測定を行うことは必須であり、照射プロセスにおける線量の許容範囲やそれを達成する照射源の出力や照射ジオメトリなどのパラメータがこの吸収線量測定の結果に基づいて決定される。また、電子線照射野の線量分布を測定することにより、照射装置の設置時における性能・仕様の確認を定期的に行うことで、一旦認証された照射プロセスの再現性を保証することができる。さらに、電子線で加工される製品内あるいはその照射設備内における最大線量、最小線量を与えるであろう位置を決定し、これらの測定点において、日常的に線量測定を行うことで照射製品の品質保証をすることもできる [3]。このように、工業用電子線照射プロセス、とくに大量生産ラインに電子線照射プロセスが適用される場合には、照射源の安定性と照射される製品の処理レベル、すなわちプロセスの仕様を担保するために吸収線量測定は必須である。

表 3.1 電子線線量測定に一般的に用いられている線量計

種類	原理	線量範囲	形状
CTA 線量計	着色	5-300 kGy	フィルム
ラジオクロミックフィルム線量計	着色	1-200 kGy	フィルム
アラニン線量計	ラジカル生成	0.01 - 75 kGy	ペレット

工業用電子線照射プロセスにおいて必要とされている吸収線量は、その用途によって数 kGy～数 MGy の広範囲に及んでいる。注射器やカテーテルなどの医療用具やシャーレ、マイクロプレートなどの理化学機器、化粧品容器の滅菌に電子線が利用される場合の線量は 1～30 kGy である。また、架橋反応、グラフト重合、キュアリングなどの放射線化学反応を工業製品利用する分野には 10 kGy～300 kGy 以上の照射が行われる。これらの利用用途の一部には、公的機関によって示された規格や指針などによって線量範囲が明確に定められており、線量測定結果の信頼性保証が不可欠である。[4, 5, 6] また、線量計測の信頼性を保証するため、放射線プロセス現場で使用される線量計システムの不確かさが国家・国際標準に遡って明示できること（トレーサビリティ）が必要になる場合もある。

日常のルーチン線量測定には一度に大量の照射製品が処理されることから、測定が簡便かつ、ハンドリングがしやすい線量計が望ましい。また照射場及び製品内部の線量分布が評価できるように線量計はできるだけ小型である必要がある。線量計として要求される特性を以下に挙げる [3]。

1. 線量、線量率を広くカバーできること
2. 放射線エネルギーによる感度依存性がないこと
3. 再現性があり、その精度が高いこと
4. 照射雰囲気（温度、湿度、光、ガラスなど）に大きな依存性がないこと
5. 照射後の経時変化（着色、減衰）が緩やかかつ少ないこと
6. 測定手続きが簡便であること
7. 安価で安定した性能の製品が入手可能あること

照射プロセスの対象物質は、ほとんど有機系のものであるため、それらと組成がほぼ同じである線量計が用いられることも多い [3]。これら条件を満たし、一般に工業用電子線照射プロセスで用いられる線量計は、固体で取扱いが容易な小型の積分型化学線量計であり、それらには表 3.2.2 のようなものがある。これらのうち、工業用電子線照射プロセスで幅広く利用されているものはラジオクロミックフィルム線量計 [7] であり、本研究ではこれを利用する。図 3.1 に電子線線量測定に利用されている市販の線量計とその外観を示す。



図 3.1 電子線線量測定に用いられている線量計の例 左上：富士フィルム社製アラニン線量計 FTR-125 [8]、右上：FWT 社製 FWT-60[9]、左下：GEX 社製 B3 線量計 [10]、右下：NPL アラニン線量計 [11]

3.3 Far West Technology 社製 FWT-60 ラジオクロミックフィルム線量計と測定システム

本研究において使用するラジオクロミック線量計とその測定システムについて述べる。FWT-60 ラジオクロミックフィルム [12, 13] は米国 Far West Technology Inc. によって製造されるラジオクロミックフィルム線量計である。最も薄い製品として、厚さが $11.5 \mu\text{m}$ のもの (FWT-60-810) があり、飛程の短い低エネルギーの電子線線量測定に適している数少ない市販の線量計である。線量範囲は $0.5 \text{ kGy} \sim 200 \text{ kGy}$ であり、線量率は $10^{12} \text{ Gy s}^{-1}$ まで対応可能である。FWT-60 線量計はナイロンマトリックスで構成され、染料であるヘキサ（ヒドロキシエチル）パラロスアニリンニトリルを含有している。約 1.15 g/cm^3 の密度で、質量基準による材料の元素組成比は C : 63.7%, N : 12.0%, H : 9.5%, O : 14.8% である。染料、ナイロンを含む溶剤溶液は、平坦度の高いガラスシート上に均一な厚さに広げられ、溶媒が蒸発して自立膜が残った後、ガラスから剥離される。出来上がったフィルムは乾燥・硬化プロセスを完了させた後、製品としてのサイズ (FWT-60-810 線量計は $15\text{cm} \times 15\text{cm}$ であり、FWT-60-1SP 線量計は $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ の正方形) に切断される。FWT-60 線量計は電子線照射によってエネルギーを与えられると、線量計材料の化学作用により青く着色する (図 3.2)。この線量計は、透過性の放射線のみならず、波長 370 nm 未満の紫外線によって染料が反応し、着色するため、測定の作業は紫外線を遮断した環境で行われる必要がある。照射後に着色した

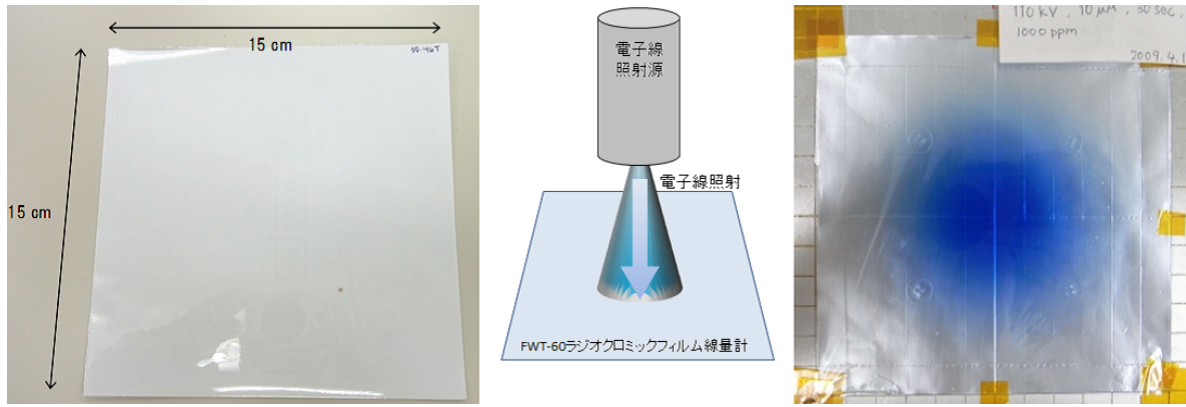


図 3.2 電子線が照射される前（左）の FWT-60-810 ラジオクロミックフィルム線量計と、電子線照射後の着色（右）

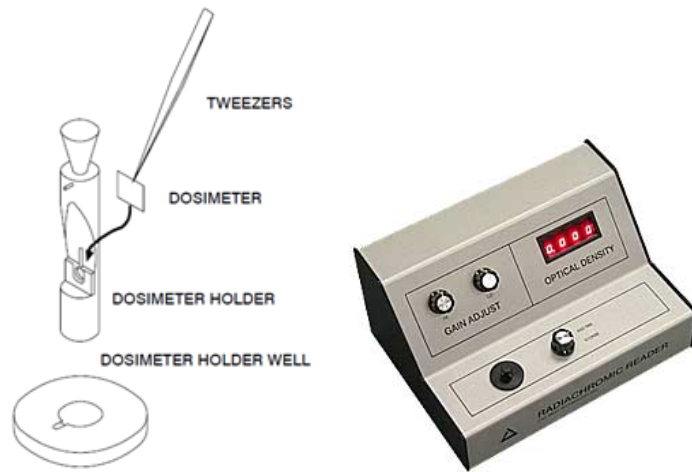


図 3.3 ラジオクロミックリーダー FWT-92D（写真）と、ラジオクロミックフィルム線量計を用いた測定 [12]

線量計は、ラジオクロミックリーダー FWT-92D によって吸光度（OD：Optical Density 値）が測定される（図 3.3）。

OD 値は次式で定義される。

$$OD(\lambda) = -\log_{10} \frac{T(\lambda)}{I(\lambda)} = \log_{10} I(\lambda) - \log_{10} T(\lambda) \quad (3.1)$$

ここで、 λ は波長、 $T(\lambda)$ は波長帯に於ける透過光量、 $I(\lambda)$ は波長帯における入射光量である。この着色による吸光度 A_f と初期状態での吸光度 A_0 の差 $\Delta f = A_f - A_0$ が測定され、各線量計の特定の正味吸光度 k を計算する。 k は次式で与えられる。

$$k = \frac{(A_f - A_0)}{t} \quad (3.2)$$

ここで、 t はフィルムの厚さを示し、製造バッチ毎に平均厚さがメーカから提供される。測定環境による紫外線などからの着色の有無を確認するために、放射線照射しないコントロール線量計を利用し、それらが測定中に大きな変化をしていないことを確認する。この k の値が吸収線量にどのように対応するかは、使用者がその用途、条件に応じて各自で行う必要がある。たとえば電子線に対する応答と線量の関係を得るためには、電子線の照射量を別の手段で測定し、その応答との関係を得なければならない。

放射線照射された線量計において、内部で発生した化学プロセスを完結させ、すべてを発色させるには時間を要し、この時間は、湿度、暴露時間、および放射線エネルギーによって異なる。24 時間ですべての着色が完了するが、この着色は熱処理によって促進することができ、90 °C で 2~3 分、60 °C で 5~15 分の暴露を必要とする。また、線量計は着色に対する吸光度変化において、波長依存性を持つ。この吸光度ピークは 605nm 付近に集中しており、線量計の OD 値を読み取るために使用する波長は、510nm および 600 nm であり、対応する吸収線量はそれぞれ、510nm : 10~200 kGy、600 nm : 1~30 kGy である [13]。2 つの波長は、異なる線量範囲に対して使用されるが、本研究においてはすべて 510 nm を使用した。本研究で利用した線量計はすべて照射後すみやかに 60 °C 15 分間の加熱プロセスを経て、FWT 社製ラジオクロミックリーダー FWT-92D によって OD 値（吸光度）が測定された。

3.4 ULEB 線量測定における問題点

ULEB 照射の産業普及が拡大しつつある中 [14, 15, 16]、そのプロセスにおける精確な線量管理に対する要求が強まっているが [1]、この要求に応えられていない現状がある。その要因となっているのが、ULEB の物質に対する阻止能の大きさに起因する、線量計の厚さと電子線の飛程の関係の問題である。電子線が物質中に入射した時、電子が物質にエネルギーを付与する深さ、すなわち飛程は、入射する電子線のエネルギーとともに短くなる。例えば、密度 1 g/cm³ の水中における電子線エネルギー別の CSDA 飛程 (CSDA; Continuous Slowing Down Approximation) は、2 MeV では 1.0 cm であるのに対し、70 keV では 78 μ m、50 keV では 43 μ m であり、従来利用されている数百 keV ~ 数 MeV のエネルギーの電子線と比較して 2 桁ほど低い [17]。その一方で、第 2 章で述べたように、工業用の電子線照射に求められる改質深さは一般的に照射される電子線飛程と同じレベルである。工業用 ULEB 照射の普及は、この ULEB の物質中における飛程の短さが、工業用途に適合したという側面がある。

従来より、ラジオクロミックフィルム線量計 [7] は、取扱いの簡便性、高いダイナミックレンジ等の特徴により、工業用電子線照射プロセスにおける線量測定に広く採用されてきており、これは ULEB プロセスにとっても有力な測定手段の候補である。しかし市販されているその線量計の厚さは十数ミクロンから百ミクロン以上であり、高エネルギー電子の飛程と比較すると十分に薄い、ULEB の飛程と比較すると厚いものが多い。前述のとおり ULEB は照射材料表面の数ミクロンレベルに集中的にそのエネルギーを付与で

きるため、照射される材料にとっても表面の数ミクロン領域での線量を把握することが産業利用での照射プロセス開発にとって重要である。しかし、表面からの厚さ数ミクロンの領域を線量計の応答のみで評価可能にする薄い線量計は現在市販されていない。そこで、ULEB の線量測定に現在市販されている十数ミクロン以上の厚さを持つフィルム線量計を用いて、ULEB プロセスに求められる線量測定を実現させることが求められる。このためには解決すべき2つの課題がある。

その一つは、ULEB 領域におけるこれら線量計の応答が未知であるということである。電子線照射されたフィルム線量計内部でその応答を生み出す化学プロセスには、1次電子線のエネルギーに対する依存性があると想定される [18]。このため、従来のフィルム線量計の応答と吸収線量を関係づける応答関数は、1次電子線のエネルギー毎に決定される必要がある。しかし、ULEB は物質中での阻止能が大きいいため、電子線出射窓や照射雰囲気ガスとの相互作用によるエネルギー損失が大きいいため、線量計表面に1次電子が到達する時点では、そのエネルギーは幅広い領域に分布する。このため、上記フィルム線量計の応答に1次電子線のエネルギー依存性を仮定する場合には、照射距離の違いを考慮しなくてはならない。このことは、例えば平面でない立体形状を持つような物への照射の場合には、その表面上の各点でエネルギー分布が異なると考えられ、応答関数は全ての点で求めなければならないという問題を提起する。しかし、1次電子線のエネルギー分布が異なるすべての点において線量計応答を校正することは、工業用 ULEB プロセスの運用において必ずしも現実的な解決方法とはいえない。

もう一つは、ULEB プロセスに求められる改質厚さと同等レベルの厚さで吸収線量評価を行う必要があることである。このためには、極薄い (1 μm レベルの) 線量計を用いて線量計内部の深度線量分布を知る必要があるが、入手可能な市販のフィルム線量計の厚さが制限されている以上、深度線量分布を実測で得ることは困難であるのが現状である。

これら2つの課題を解決するために、本研究は下記の手法を提案し、その有効性を検証する。ULEB に対する線量計応答のエネルギー依存性の問題に対しては、高エネルギー電子線照射によって得られた応答-吸収線量の対応関係を ULEB に適用し、その適用範囲を確認する。このために、まずフィルム線量計の応答と吸収線量の対応関係を国家標準までトレーサブルに校正することを行う。これには国家標準までトレーサブルに吸収線量を測定可能な基準線量計と、その適用に対応するエネルギーの高エネルギー電子線を利用する。ここで校正された応答関数は、厳密には校正のための照射における条件のみしか絶対線量として適用できないため、この応答関数をそのまま ULEB の線量測定には絶対線量として適用することはできない。本研究では、高エネルギー電子線で校正された応答関数を利用することで、相対線量として ULEB 吸収線量を評価することを試み、その有効範囲を確認する。この手法を適用するにあたり留意すべき点が2つある。一つは照射される電子線のエネルギーが違うことであり、もう一つは高エネルギー電子線照射されたフィルム線量計はその深度線量分布がほぼ均一であるのに対し、ULEB 照射されたものは不均一な深度線量分布を持つことである。このため、高エネルギー電子線で校正された応答関数を ULEB に適用した場合の線量計の反応飽和値、線量上限など化学的な特性に関連す

る適用範囲を種々の ULEB 照射条件において実験的に把握しておく必要がある。

また、ULEB が線量計内部に発生させる不均一な深度線量分布に対する問題に対しては、その深度線量分布を知る手法としてシミュレーションコードを採用する。低エネルギーの電子線量計測では線量測定手段が限定されるために、線量評価の補助手段として行われる線量計算（シミュレーション）が重要な役割を占める [1]。シミュレーションコードは様々な照射構造や材料において、簡便に深度線量分布を得られる手段であり、その適用性を評価することは重要である。

これまで、低エネルギー電子線源の線量測定に対して幾つかの報告がある。例えば、清藤らは 110 keV 電子線照射場におけるエネルギーフルエンスについて、カロリメータ、ラジオクロミックフィルム、モンテカルロシミュレーションの 3 つの方法で比較評価している [19]。また、Helt-Hansen らは 80-120 keV 電子線のフィルム線量計の応答についてグラフィイト製のカロリメータを用いて比較、校正を行っている [18, 20]。彼らはいずれもカロリメータによる独自の校正をしており、国際・国家標準までトレーサブルな手法で校正された線量計を基準として 70 keV 以下の ULEB に対する応答評価を試みた研究はされていない。カロリメータによる校正は照射場のエネルギーフルエンスを正確に評価するのに対して有効な手段である。しかし、ULEB 源の工業応用を見据えた場合、生産の現場において被照射物の吸収線量を見積る場合にはその形状、測定作業に対する柔軟性などの点からカロリメータよりもフィルム線量計を利用したほうが簡便で適している。

第 4 章、第 5 章では、市販のラジオクロミックフィルム線量計を利用することで、ULEB の工業応用に必要とされている数ミクロンレベルでの線量評価手法を確立する。そのために、高エネルギー電子線で国際標準トレーサブルに校正した市販のラジオクロミックフィルム線量計の応答と、シミュレーションによって得た線量計内の深度線量分布を用いることで、ULEB 線量測定への適用性を定量的に評価する。線量計は、市販にて入手可能な最も薄いフィルム線量計の一つである、厚さ 10 μm 程度の薄いラジオクロミックフィルム (FWT 社製 FWT-60-810) を用いた。線量計内の深度線量分布を得るためのシミュレーションコードは電子-光子輸送モンテカルロシミュレーションコード PENELOPE[21] を利用した。PENELOPE で各実験の電子照射構造を模擬し、電子エネルギーに対する線量計へのエネルギー付与率と実験結果を比較することで、ULEB 照射の線量評価に対するシミュレーションの有用性を示す。まず、FWT-60 ラジオクロミックフィルム線量計の応答、すなわち吸光度 (OD 値) と吸収線量の関係を高エネルギー電子線と基準線量計 (アラニン線量計) [22] により国際標準までトレーサブルに校正した。そこで得られた応答関数を用いて、線量計に加速電圧 50 kV, 70 kV で電子線照射を行った時の吸収線量を測定し、シミュレーション結果と比較検討し、その適用性を評価した。次に、市販のフィルム線量計を用いて、線量計の厚さよりも薄い領域の線量を求める手法を評価した。モンテカルロシミュレーションで得た線量計内部の深度線量分布と、フィルム線量計の応答を組み合わせることで、線量計内部の深度線量分布を計算し、その結果を実測により ULEB の加速電圧範囲で検証した。次章からは、これら技術研究について詳述する。

第3章の参考文献・引用

- [1] 放射線照射振興協会 大線量測定研究委員会編『工業照射用の電子線線量計測』地人書館, P48 (1990)
- [2] 工藤久明 編著『原子力教科書 放射線利用』オーム社, P11 (2011)
- [3] 清藤一, 「放射線照射工程管理のための化学的線量評価・計測手法に関する研究」博士論文, 東京理科大学 (2012)
- [4] *Sterilization of health care products —Radiation — Part 1:Requirements for development, validation and routine control of a sterilization process for medical devices,* , ISO/ASTM 11137-1 (2006)
- [5] *Sterilization of health care products —Radiation — Part 2: Establishing the sterilization dose,* , ISO/ASTM 11137-1 (2006)
- [6] *Sterilization of health care products —Radiation — Part 3: Guidance on dosimetric aspects,* , ISO/ASTM 11137-1 (2006)
- [7] *K.C. Humpherys, A.D. Kantz, RADIACHROMIC: A radiation Monitoring System, Radiat. Phys. Chem., Vol.9, P737-747 (1977)*
- [8] 富士フィルム株式会社ホームページより引用 http://fujifilm.jp/business/material/film_dosimeter/ftr125/ 最終アクセス日: 2017/10/30
- [9] 東洋メディック株式会社ホームページより引用 <http://www.toyo-medic.co.jp/keisoku/products/fwt60.html> 最終アクセス日: 2017/10/30
- [10] 株式会社千代田テクノルホームページより引用 <http://isotope.c-technol.co.jp/products/sokutei/s09-00b3-top.html> 最終アクセス日: 2017/10/30
- [11] National Physics Laboratory U.K. Web site より引用: <http://www.npl.co.uk/science-technology/radiation-dosimetry/research/chemical-dosimetry> 最終アクセス日: 2017/10/30
- [12] *Operational Manual, MODEL FWT-92D RADIACHROMIC READER Rev.2B,* Far West Technology, Inc. (2005)
- [13] *Using radiachromic dosimeters: Product Application Literature PAL-1,* Far West Technology, Inc. (2013)
- [14] A. J Berejka, and M. R. Cleland, *Industrial radiation processing with electron beams and X-rays,* in sec. 2.5, P25, IAEA, (2011)

- [15] W. Scharf, and W. Wieszczycka, *Electron accelerators for industrial processing-a review*, AIP Conf. Proc. **475**, 949 (1999)
- [16] A. J Berejka, *Prospects and challenges for the industrial use of electron beam accelerators*, in proceedings of International Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators, IAEA (2009)
- [17] Calculated by using Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions, <http://www.nist.gov/pml/data/star/>. 最終アクセス日 : 2017/10/30
- [18] Jakob Helt-Hansen, Arne Miller, Peter Sharpe, Bengt Laurell, Doug Weiss, Gary Pageau, Radiat. Phys. Chem. **79**, 66 (2010)
- [19] H. Seito, S.Matsui, T. Hakoda, M. Ishikawa, Y. Haruyama, H. Kaneko, J. Kimura, and T. Kojima, Material Technology **30**, 10 (2012)
- [20] J. H.-Hansen, A. Miller, S. Duane, P. Sharpe, M. McEwen, S. Clausen, Radiat. Phys. Chem.**74**, 354 (2005)
- [21] J. Baro, J.Sempau, J. M. F-Varea, and F. Salvat, Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. B **100**, 31 (1995)
- [22] Alanine reference dosimetry service for 1 MeV to 4 MeV industrial electron beams
<http://www.npl.co.uk/science-technology/radiation-dosimetry/products-and-services/alanine-reference-dosimetry-service-for-1-mev-to-4-mev-industrial-electron-beams>. 最終アクセス日 : 2017/10/30

第 4 章

ULEB 照射されたラジオクロミックフィルム線量計の応答特性評価

4.1 第 4 章の概要

第 4 章では、工業用 ULEB 照射プロセスにおいて実施される線量測定およびプロセス設計のために、薄いラジオクロミックフィルム線量計を用いた吸収線量測定と、そのモンテカルロシミュレーション結果との比較を行った。加速電圧 2 MV の高エネルギー電子線を照射したラジオクロミックフィルム線量計の応答をアラニン線量計の吸収線量によって校正し、測定不確かさ 11 % ($\sigma = 2$) の範囲内で線量計応答を吸収線量に変換できる応答関数を得た。この応答関数を利用して ULEB 吸収線量測定を行った結果、ULEB 吸収線量は 10 kGy から 100 kGy まで線形性が維持されることが実験で明らかになった。また、ラジオクロミックフィルム線量計内に付与されたエネルギーによる線量計応答とモンテカルロシミュレーションとの間の偏差は、高エネルギー電子線、ULEB 吸収線量測定ともに 15% 以内であった。高エネルギー電子線照射によって校正されたラジオクロミックフィルム線量計の応答関数とシミュレーション結果を利用することは、相対線量による ULEB 照射プロセスの設計と線量管理に有効であることが示された。

4.2 第 4 章の研究背景

電子線の線量測定には、取扱が容易なラジオクロミックフィルム線量計を用いるのが一般的である [2] が、ラジオクロミックフィルム線量計の電子線に対する応答を評価した報告は 80 keV までである。このため、それ以下のエネルギーの電子線の産業応用においては、その照射量をラジオクロミックフィルム線量計による線量測定のみによって正確に管理する手法が無い状況が続いていた [1]。80 keV 以下のエネルギー領域におけるラジオクロミックフィルム線量計の応答特性を評価することは、ULEB 照射源の産業普及とそこで求められる線量管理のためにも重要かつ必須の課題である。

ラジオクロミックフィルム線量計を線量管理に利用するためには、その応答は、線量計

の単位質量に付与されたエネルギー量である吸収線量（単位：Gy）として校正されている必要があるが、絶対線量でラジオクロミックフィルム線量計の校正を行うことは以下の理由により現実的ではない。ラジオクロミックフィルム線量計の応答は、線量計を構成する分子と入射電子（1次電子）との衝突を起点とする化学プロセスを経て生成されるが、このとき線量計内部に入射した1次電子によって生成される2次電子の数とその運動エネルギーの分布は、1次電子のエネルギー分布により異なる。このため、もし線量計の応答に寄与する化学収量が一次電子エネルギーに依存するのであれば、その1次電子エネルギー分布が未知である場合、線量計の応答のみから線量計に付与された絶対的な線量を一意的に決定することはできない。したがって、ラジオクロミックフィルム線量計をULEBで校正するためには、基準線量計を利用して正確な吸収線量を得て、ラジオクロミックフィルム線量計の応答と基準線量計の線量との関係を、電子線の照射条件毎に求める必要がある。

また、ULEBは従来の高エネルギー電子線と比較して物質の阻止能が大きいため、ULEBが大気中に照射されると、電子線出射窓や被照射物とのエアギャップにある物質によって照射源から発生した電子のエネルギーは漸次減衰される。電子の初期エネルギーを決定する加速電圧以外の照射条件によっても、被照射物表面に入射する1次電子のエネルギー分布は、被照射物の位置や表面形状などの条件によって大きく変化する。図4.1は70 keV以下の電子線が大気中に照射された場合に被照射物に入射する電子のエネルギー分布を表したものである。横軸は電子のエネルギーであり、縦軸は確率密度を表す。電子エネ

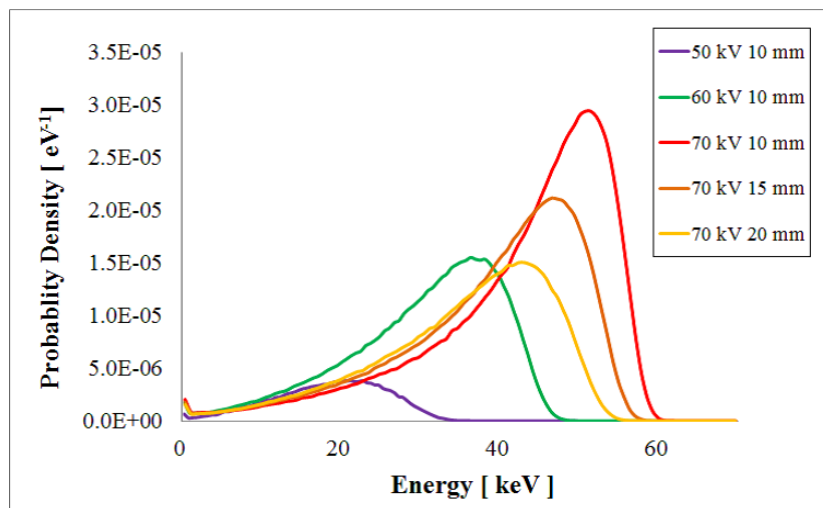


図 4.1 ULEB 照射源から大気圧窒素雰囲気中に照射された電子のエネルギー分布

ルギーは各条件の最大エネルギー（加速電圧に相当するエネルギー）の100分の1に相当する ΔE で刻まれた離散的な分布である。縦軸 $P(E)$ の値と ΔE の積を全エネルギー区間で積算したものが、電子線出射窓とエアギャップ層を通過する電子の透過率 T を表す。

$$T = \sum_{E_i=0}^{E_{max}} P(E)\Delta E \quad (4.1)$$

電子線のエネルギー分布は、加速電圧だけでなく、電子線出射窓から照射される材料表面までの距離によっても大きく変化することがわかる。ULEB プロセスが適用される被照射物は平面とは限らず、凹凸がある立体形状を持つものが多い。被照射物の各点で照射距離が異なることになり、前述のようにそれぞれの点で1次電子のエネルギー分布が変化する。線量計内部に発生する化学プロセスが被照射物上の各点で異なることになり、厳密には立体形状を持つ被照射物の全ての点に対応する校正が必要になる。しかし、様々な産業において簡便に ULEB 照射源を利用し、その出力とプロセスを管理することを想定した場合、この作業は著しく煩雑なものとなる。

もう一つは基準線量計の問題である。国家標準までトレーサブルな線量を測定できるような基準線量計はガンマ線や高エネルギー電子線にのみ対応しており、ULEB 電子線照射には対応していない。このため、基準線量計を用いた ULEB 照射による直接的フィルム線量計の校正は現状において不可能である。このような技術的背景もあり、ULEB の線量をラジオクロミックフィルム線量計を用いて測定できる手法は提案されていないのが現状である。

上記課題を解決するために、第4章の研究では、ラジオクロミックフィルム線量計の応答を、基準線量計が対応できる高エネルギー電子線で校正し、その結果を ULEB 照射時の応答に適用する手法を評価する。ラジオクロミックフィルム線量計の応答と吸収線量の関係式を求めるためには、線量計に入力されたエネルギーを正確に知る必要がある。このため、国家標準までトレーサブルな線量を得ることが出来る基準線量計（アラニン線量計）による線量計測サービスを利用した。基準線量計が対応する電子線エネルギー範囲である 2 MeV 高エネルギー電子線を、ラジオクロミックフィルム線量計と基準線量計に同時照射することでラジオクロミックフィルム線量計の吸収線量に対する応答を校正した。こうして得られた高エネルギー電子線照射に対する校正曲線（応答関数）を ULEB の線量測定に適用する。評価は電子線照射量に対する線量計応答の線形性の確認と、その結果のモンテカルロシミュレーション結果との一致性を確認することで行った。

4.3 高エネルギー電子線によるラジオクロミックフィルム線量計応答の校正

ラジオクロミックフィルム線量計の応答と吸収線量の間関係を導くため、国家標準までトレーサブルな線量測定が可能な基準線量計を用い、基準線量計の適用が可能な高エネルギー電子線照射によってラジオクロミックフィルム線量計の応答を基準線量計の線量で校正した。ラジオクロミックフィルム線量計の応答値と、基準線量計から得られた線量に基づいて、ラジオクロミックフィルム線量計の 2 MeV 電子線照射に対する応答関数が得られた。校正の結果は測定の不確かさとともに評価した。

4.3.1 基準線量計

ラジオクロミックフィルム線量計の応答を校正するための基準線量計には、NPL(National Physics Laboratory: UK) のアラニン線量計による校正サービス (Alanine reference dosimetry service) を用いた [3]。これは郵送によって受取ったアラニン線量計に電子線照射した後返送し、その吸収線量は国家標準までトレーサブルに測定可能なサービスである。4つのアラニン線量計ペレットが1枚のディスクに収納されて、ホルダー内に設置される (図 4.2)。ホルダーにはアラニン線量計が入ったディスクとフィルム線量計を設置できるスペースがある。ラジオクロミックフィルム線量計とアラニン線量計を配置した線量計ホルダーのレイアウトを図 4.3 に示す。アラニン線量計は1つの円盤内に4個設置され、照射後に郵送でNPLに返却され、Electron Spin Resonance (ESR: 電子スピン共鳴吸収法) によってその吸収線量が正確に測定される。アラニン線量計の応答と吸収線量の関係には温度依存性があるため、線量計ホルダーには温度条件を記録するための温度インジケータが貼られている。校正に用いるアラニン線量計がABS樹脂製ペレット内の深さ 1.5 mm の位置にある構成上、ULEBはこの樹脂を透過して線量計に到達することができない。このため、照射される電子線のエネルギーは 1 MeV から 4 MeV と指定されており [3]、このサービスを利用して 1MeV 未満の電子線をアラニン線量計とラジオクロミックフィルム線量計へ照射しての直接校正はできない。

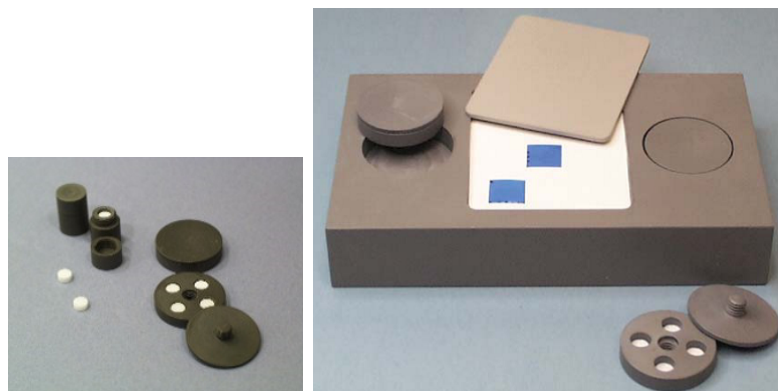


図 4.2 NPL の線量計校正サービスに使用するアラニン線量計ペレット (白) と4つのアラニン線量計を収納するディスクおよびフォルダ

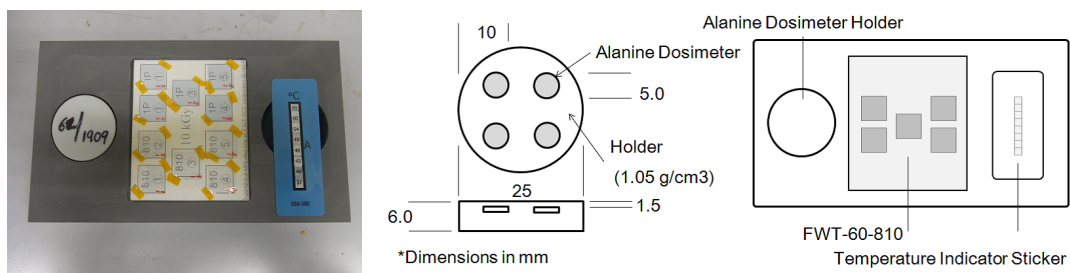


図 4.3 線量計ホルダー内での NPL 製アラニン線量計と FWT60-810 線量計の配置

表 4.1 電子線照射時の各パラメータ

	E [kV]	I [mA]	L [cm]	V [m/min.]	Window material	t [μm]
High Energy (JAEA)	2000	2	20	1.74	Titanium	50
Low Energy (GPI)	50	0.11 ~ 1.1	1	2	Aluminum	11
	70	0.16 ~ 1.6	1	0.4	Aluminum	11

4.3.2 高エネルギー電子線照射装置

校正における高エネルギー電子線照射には、日本原子力研究機構高崎量子応用研究所（現量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所）の1号加速器 [4] を利用した。照射レイアウトを概略化したものを図 4.4 に、各照射パラメータを比較したものを表 4.1 に示す。電子線加速器の真空管内部にあるフィラメントから発生し、電圧 E kV で加速され

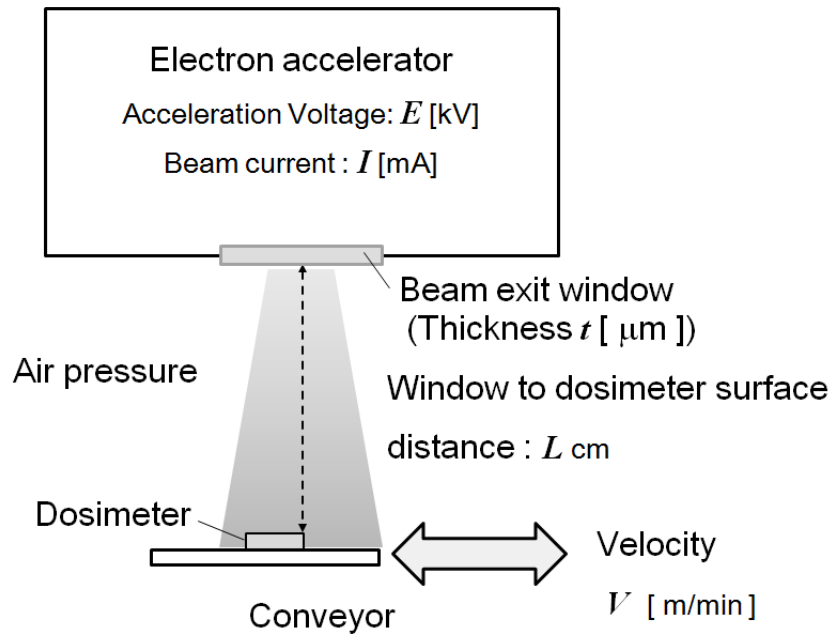


図 4.4 電子線照射時の配置

た、電流 I mA の電子線は出射窓を通して大気中に照射され、出射窓から距離 L 離れた位置に置いた線量計にエネルギーを付与する（図 4.4）。線量計はコンベヤにより速度 V で、電子線の走査方向と垂直な方向に搬送した。

4.3.3 校正のための高エネルギー電子線照射

校正の手続きは参考資料に基づいて行った [3, 5, 6, 7, 8]。付属の線量計ホルダーにはアラニン線量計だけでなく、フィルム線量計を設置できるスペースがあり、両方の線量計を同時に照射できる（図 4.2, 4.3）。このスペースに 1 cm 角にカットされたラジオクロミックフィルム線量計を各照射条件で 5 枚ずつ基準線量計ホルダー内に配置した。電子線加速電圧は 2 MV である。線量計ホルダーは電子線照射エリアを横切る毎に 1 回の照射を受

ける。電子線出力の電流値 I 、または線量計の搬送速度 V を調節することで、1 回の照射で線量計に付与されると想定される吸収線量が 10 kGy となるように電流及び搬送速度を設定した。吸収線量は照射回数を積算することで調整し、10 kGy (1 回照射) から 100 kGy (10 回照射) までをターゲットとして 10 kGy 間隔で計 10 バッチ照射した。照射中の電流値と搬送速度は常時モニターしており、表 4.1 に示すように、それぞれ 2.0 ± 0.015 mA、 1.74 ± 0.087 m/min. であった。校正時の電子線照射エリアと線量計の搬送部の様子を図 4.5 に示す。



図 4.5 線量計フォルダーへの 2 MeV 電子線照射

4.3.4 校正方法

校正のための 2 MeV 高エネルギー電子線照射後、ラジオクロミックフィルムの応答が測定され、NPL より測定・報告されたアラニン線量計の吸収線量と、ラジオクロミックフィルム線量計の応答との関係（応答関数）が求められた。ラジオクロミックフィルム線量計の応答は、高エネルギー電子線照射後間もなく 60 °C で 15 分間の色素定着プロセスを経た後、ラジオクロミックリーダー FWT-92D (FWT 社製) により測定された。アラニン線量計は、高エネルギー電子線照射後すみやかに NPL に返却され、後日、各照射バッチにおけるアラニン線量計の吸収線量が測定不確かさとともに報告された。両線量計の測定結果に基づき、ラジオクロミックフィルム線量計の応答に対するアラニン線量計の線量をプロットした。

4.3.4.1 OD 値と吸収線量の関係と線量計の初期特性

FWT-60-810 線量計の応答から吸収線量を求めるには線量計の初期特性（初期 OD 値、厚さ）を把握することが重要である。電子線照射後の FWT-60-810 線量計の吸収線量は、フィルムの OD 値より以下の式 (4.2) を用いて算出する [9]。照射前の初期 OD 値を A_0 、

照射後の OD 値を A_f 、それらの差分を ΔOD 、FWT-60-810 線量計の厚さを t とすると、FWT-60-810 線量計の単位長さあたりの OD 値の増分 k が次式で定義できる。

$$k = \frac{A_f - A_0}{t} = \frac{\Delta OD}{t} \quad (4.2)$$

吸収線量 D は、 k の値を用いて次式で与えられる。

$$D = \left(\frac{k}{a} \right)^{1/b} \quad (4.3)$$

ここで、 a 及び b は FWT-60-810 線量計の材質に依存したパラメータである。既知の線量、すなわちアラニン線量計で測定された吸収線量値 D_{calib} を FWT-60-810 線量計に照射したときの k の振る舞いを式 (4.3) で近似することによって、 a 、 b を最小二乗法より決定する。式 (4.3) から、吸収線量 D の精度は k の値に依存し、照射前に FWT-60-810 線量計厚さ t と初期 OD 値 A_0 を測定しておく必要があることがわかる。

今回測定に用いた FWT-60-810 線量計 (購入パッケージ内の平均厚さ $11.25 \mu\text{m}$) は、すべてその厚さと初期 OD 値を測定した。測定された線量計の厚さ分布を図 4.6(a) に示す。図中黒丸は実測値を表し、厚みの幅は $\pm 0.2 \mu\text{m}$ である。実線は正規分布近似曲線をあらわす。FWT-60-810 線量計の厚みはダイヤルシクネスゲージで計測した。計測した FWT-60-810 線量計 50 枚の平均厚さは $12.1 \mu\text{m}$ 、半値全幅 (FWHM) は $0.45 \mu\text{m}$ であった。その中で、平均厚さ近傍にある FWT-60-810 線量計 20 枚の初期 OD 値の分布を図 4.6(b) に示す。図中、黒丸は実測値、実線は正規分布近似曲線をあらわす。初期 OD 値は 0.045 から 0.051 まで分布し、平均値は 0.0468、FWHM は 0.0042 であった。

個々の FWT-60-810 線量計の厚さと初期 OD 値を測定せずに、平均値や代表値を利用することは大きな測定誤差の原因になる。図 4.6(a) から FWT-60-810 線量計の厚さは $10 \mu\text{m}$ から $14 \mu\text{m}$ まで分布していることがわかる。しかし、個々の FWT-60-810 線量計の厚さを適用せずに、すべての FWT-60-810 線量計についてパッケージの平均厚さ $11.25 \mu\text{m}$ を用いて式 (4.2)、(4.3) により吸収線量を計算すると、同じ OD 値を得られた場合でも吸収線量は -2.8% から $+23.2 \%$ までの分布を持つことになる。同様に、図 4.6(b) のように初期 OD 値も分布をもっていることから、初期 OD 値については平均値 0.047 を全ての FWT-60-810 線量計に採用した場合には 10 kGy で -19% から $+9.8 \%$ 、 100 kGy で -2.9% から $+1.5 \%$ の分布をもつことになる。OD 値は 10 kGy で 0.080、 100 kGy で 0.180 であり、OD 測定器の表示が 0.001 単位であることから、低線量領域の方が初期 OD 値の影響が大きい。このことは、特に低線量領域において、線量計個々の初期

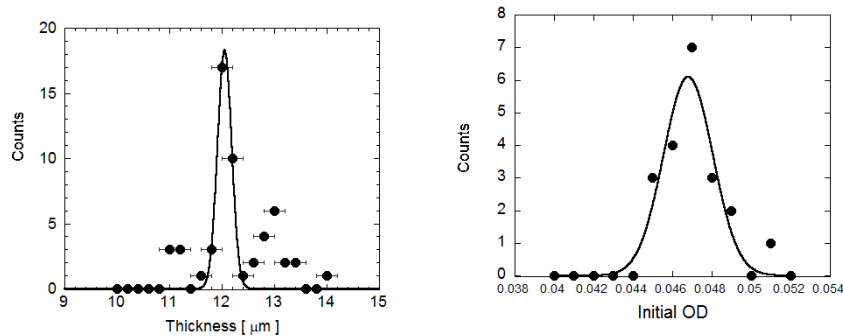


図 4.6 (a) 校正に用いた FWT-60-810 線量計の厚さ。(b) 平均厚さ付近 $12.1 \pm 0.1 \mu\text{m}$ の FWT-60-810 線量計の初期 OD 値の分布

値や厚さの測定ができない場合には、その線量評価に最大 20 % 程度の誤差が生じることを示している。今回の測定において、式 (4.2) による k の算出には、FWT-60-810 線量計各々の初期 OD 値 A_0 及び FWT-60-810 線量計の厚さ t を使用した。

4.3.5 高エネルギー電子線照射された基準線量計による校正結果

アラニン線量計の吸収線量と FWT-60-810 線量計線量計 (FWT-60-810) の応答の関係をプロットし、式 (4.3) に基づいて回帰曲線を求めることにより今回の校正に用いた FWT-60-810 線量計の高エネルギー電子線照射に対する応答関数が得られた。結果を図 4.7 に示す。図中の黒丸は各照射バッチにおける実験値を表す。X 軸の値は、5 枚の FWT-60-810 線量計線量計から求めたフィルムの単位長さ当たりの OD 値の増分 k の平均値であり、エラーバーはその最大値および最小値を表している。これら各バッチ内における偏差は、主に FWT-60-810 線量計材料の特性に起因する。一方、Y 軸の値は、5 枚のアラニン線量計の吸収線量の平均値であり線量の校正值を与える。図中の実線は、式 (4.3) で定義した近似曲線で、次式で与えられる。

$$D = \left(\frac{k}{0.306} \right)^{1/0.826} \quad (4.4)$$

R^2 値は 0.998 であった。FWT-60-810 線量計は、線量 10 kGy から 100 kGy の間で、式 (4.4) が十分適用でき、この式 (4.4) を利用することで、 k に対して高エネルギー電子線照射に対応する吸収線量を求めることができる。

校正照射において各パラメータの測定に起因する個々の不確かさと、その結果吸収線量算出結果に統合される不確かさを求めた。表 4.2 は校正照射における不確かさを表したものである。考慮された不確かさには、基準線量計と FWT-60-810 線量計の応答読み取り

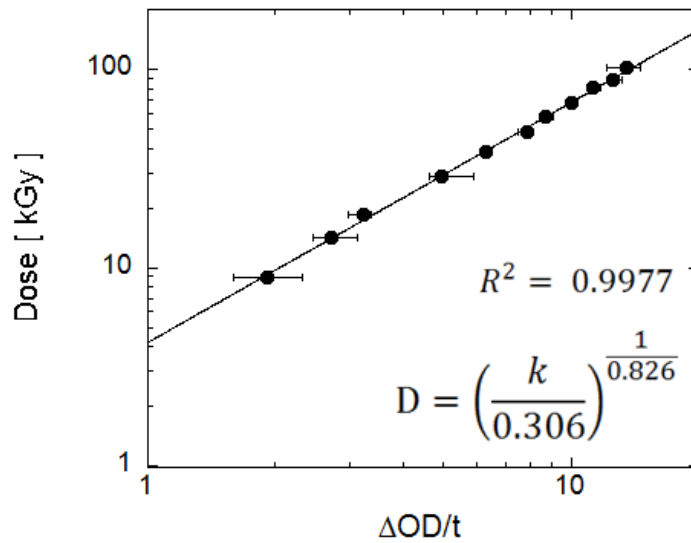


図 4.7 FWT-60-810 線量計 (FWT-60-810) の校正曲線

表 4.2 2 MeV 電子線を用いた校正照射における測定不確かさ

Components of uncertainty for the calibration experiment	(%)
1. Components of Uncertainty in the calibration of reference dosimeters	
1-1. Calibration of this batch of alanine dosimeters	2.40
1-2. Variation between Individual dosimeters within this batch	1.00
The overall uncertainty associated with individual alanine dosimeters readings (1-1, 1-2)	2.60
2. Components of uncertainty in the film dosimeter system	
2-1-1. Initial OD reading (prior to irradiation)	3.7
2-1-2. Final OD reading (after irradiation)	1.2
2-1-3. Thickness measurements	2.4
2-1 Overall uncertainty associated with absorbed dose calculation (2-1-1, 2-1-2, 2-1-3)	3.5
2-2 Temperature and humidity dependence	3.4
The overall uncertainty associated with film dosimetry system (2-1, 2-2)	4.9
Total uncertainty for calibration experiments (Coverage factor is 2)	11

および線量算出過程に含まれる不確かさが含まれている。結果として、校正照射における統合不確かさは $\sigma = 2$ において 11.0 % と計算された。

4.4 高エネルギー電子線照射の応答で校正されたラジオクロミックフィルム線量計を用いた ULEB 線量測定実験

アラニン線量計と高エネルギー電子線照射によって得られたラジオクロミックフィルム線量計 FWT-60-810 の応答関数を ULEB 線量測定に適用する実験を行った。

4.4.1 ULEB 線量測定実験の構成と方法

ULEB 照射装置は浜松ホトニクス株式会社製 EB-ENGINE[®] system を使用し、照射構造や線量計とその測定方法は校正時と同じである (図 4.4)。測定時の電子線の加速電圧は 50 kV, 70 kV である。出射窓の材料はアルミニウムで厚さは 10.5 μm であり、真空封止性能を保ちつつ、ULEB を効率よく取り出すことができるよう構成されている。ULEB は大気によるエネルギー吸収が大きく、線量計に十分な線量を与えるためには出射窓から FWT-60-810 線量計までの距離 L を短くする必要があることを考慮し、10 mm とした。照射は FWT-60-810 線量計の搬送速度を一定にし、管電流を増加させることにより FWT-60-810 線量計の吸収線量を増加させていった。ターゲット線量 10 kGy での電流値を加算していくことで 10, 20, 50, ..., 100 kGy (50 kGy ~ 100 kGy は 10 kGy 間隔) のターゲット線量で照射を行った。これにより、線量率は 50 kV で 6.85 kGy/s から 72.8 kGy/s、70 kV においては 28.5 kGy/s から 343 kGy/s まで単調増加で変化している。また、高エネルギー電子線による校正時と同じく、1 条件の照射には 5 枚の FWT-60-810 線量計を用い、すべての線量計についてイニシャル OD 値、厚さの個別補正を行った。

4.4.2 ULEB 線量測定結果

実験の結果、ULEB に対する FWT-60-810 線量計の応答特性が得られ、50 kV, 70 kV において照射量に対する線形性が 100 kGy まで確認された。測定結果を高エネルギー電子線による校正時のデータとあわせて図 4.8 に示す。図 4.8 の横軸は線源から FWT-60-810 線量計の単位面積あたりに付与された電荷量 (単位面積あたりの電流と FWT-60-810 線量計への照射時間の積) であり、縦軸は応答関数 (図 4.7) から得られた吸収線量である。プロットは 1 条件での測定に用いた 5 枚の FWT-60-810 線量計の応答から計算された吸収線量の平均値を表し、エラーバーは 5 枚中の最大値、最小値を表している。各加速電圧における測定結果に対し、平均値、最大値、最小値のプロットの線形回帰直線を最小二乗法により求めた。平均値による回帰直線の相関係数 R^2 は 50 kV が 0.992、70 kV と 2 MV では 0.999 であった。結果として、高エネルギー電子線照射によって得られた応答関数を ULEB 照射に適用した場合、10 kGy から 100 kGy までは応答線形性が確保できていることが判った。

この結果を利用して、モンテカルロシミュレーションによる ULEB 線量測定の再現性を評価するため、上記実験結果から電子 1 個あたりの平均エネルギーデポジット E_d を求

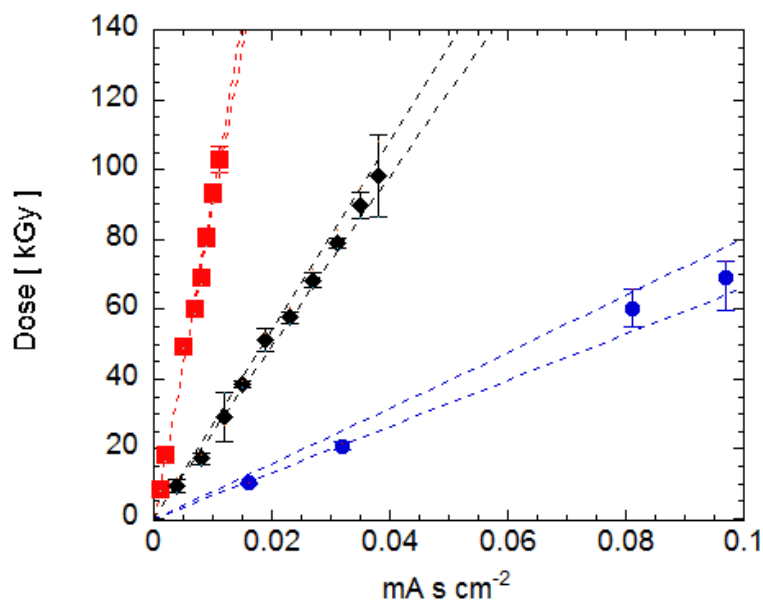


図 4.8 単位面積あたりの電荷密度に対する FWT-60-810 線量計の線量：赤 50 kV、青 70 kV、黒 2 MV

表 4.3 Fig.4.8 から求めた各電子線照射における傾き k_D

Acc. Volt	k_D Dose/mC cm ²		
	Ave.	Max.	Min.
50 kV	840	932	749
70 kV	5369	5478	5217
2 MV	2601	2820	2356

めた。図 4.8 中の各加速電圧における回帰直線の傾き k_D は、各測定時における FWT-60-810 線量計の単位面積上に電荷 1 mC が照射された場合の吸収線量の変化を表しており、これらを表 4.3 に示す。この表 4.3 の傾き k_D から FWT-60-810 線量計への電子 1 個あたりの平均エネルギーデポジット E_d を計算することができる。 E_d [eV/electron] は次式で与えられる。

$$E_D = \frac{mk_D}{eN_e} \quad [\text{eV/electron}] \quad (4.5)$$

ここで、 e は電荷素量、 m [g] は測定に用いた FWT-60-810 線量計 1 枚分の質量、 N_e 照射電子の電荷面密度である。各条件の測定結果から得られた E_d の値 E_{dm} を表 4.5.2 に示す。こうして実測から求められた電子 1 個あたりの平均エネルギーデポジット量 E_{dm} が、モンテカルロシミュレーションによって再現されるかを検証する。

4.5 ULEB 線量測定 of モンテカルロシミュレーション

高エネルギー電子線、および ULEB 照射による FWT-60-810 線量計を用いた線量測定結果をモンテカルロシミュレーション結果と比較した。本研究で利用するモンテカルロシミュレーションコード PENELOPE (PENetration and Energy LOss of Positrons and Electrons in matter) [10, 11, 12, 13] は、バルセロナ大学の F.Salvat 氏らによって開発され、電子追跡の最小エネルギーが 100 eV と EGS5[14] に代表される他の汎用のシミュレーションコードより低いことが特徴の一つであり、ULEB によるエネルギー付与過程がより正確に計算できる [15]。高エネルギー電子線照射によって校正された FWT-60-810 線量計の応答関数を用いた ULEB 線量測定結果を、PENELOPE による計算結果がどの程度再現するかを検証する。まず、高エネルギー電子線照射による校正時の結果と PENELOPE の結果の一致性を確認する。次いで、PENELOPE の有効エネルギー範囲を踏まえ、ULEB 線量測定結果と PENELOPE の結果を測定の不確かさとともに比較・評価する。

4.5.1 電子線照射時における吸収線量のシミュレーション構造

高エネルギー (加速電圧 2 MV) と低エネルギー (加速電圧 50, 70 kV) の各電子線照射による FWT-60-810 線量計の吸収線量の結果を、モンテカルロシミュレーションコード PENELOPE による計算結果と比較した。PENELOPE の計算においては、上記 2 つの条件での吸収線量測定実験を図 4.9 のようにモデル化した。

円筒座標系 (r, z) 上において、すべての試行電子は z 軸に沿って真空中から第 1 マテリアル面 (電子線出射窓: アルミニウム) へ垂直に入射する。電子線出射窓に入射後は、そのエネルギーが 100 eV 以下になるまで、各材質内での様々な相互作用過程を追跡される。計算では、各材質厚さの 100 分の 1 に相当する単位区間毎に、電子から各材質へのエネルギー付与量が計算され、この結果に基づいて各材質の厚さ (侵入深さ) 方向に対する電子 1 個当たりの深度線量分布を得る。なお、2 つの実験に用いた電子線照射源はいずれも走査型であるのに対して、PENELOPE の計算は円筒座標系上の点線源で行っているが、走査されるビームは 2 つの照射源ともほぼ一様な面線源である。しかし、線源から出射される電子線は走査幅方向にほぼ一様であり、線源の走査幅と搬送する始点と終点までの距離は点線源からの電子線の拡がりよりも十分大きい。このため、線量計は点線源から r 方向 (図 4.9: 電子線走査と同じ面で垂直な方向) へ拡がる電子線の影響をすべて平均して受けると考えるモデルで実験を近似できる。また、点線源が走査されている照射エリアを線量計が通過するとき、線源の走査周波数は線量計の搬送速度に対して十分速いため、電子線の走査による照射バッチ毎の線量変動は無いとみなされる。このようにして PENELOPE で計算された FWT-60-810 線量計へのエネルギーデポジット量 E_{ds} を実測によって得られたエネルギーデポジット量 E_{dm} と比較した。

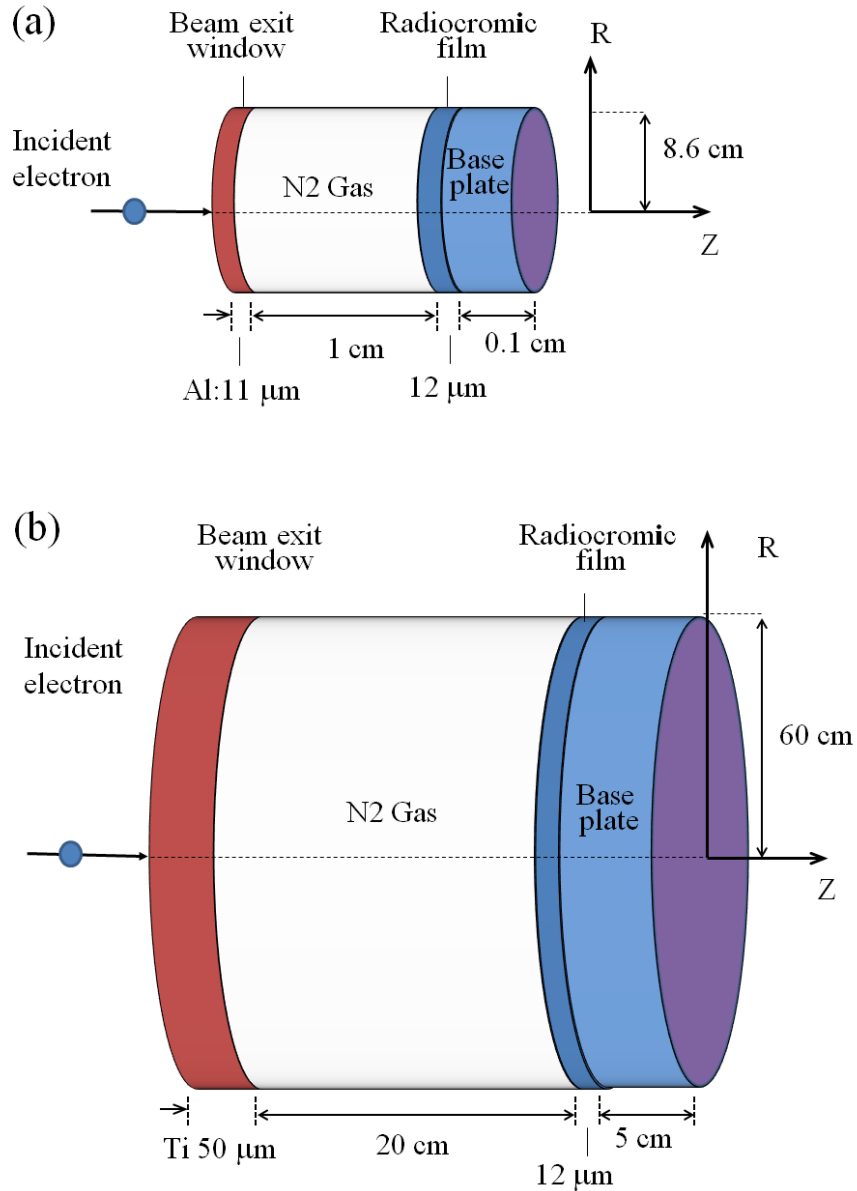


図 4.9 PENELOPE による計算のジオメトリ

4.5.2 シミュレーション結果と実測値の比較

PENELOPE によって計算された電子 1 個あたりの平均エネルギーデポジット E_{ds} と実測によって得られたエネルギーデポジット量 E_{dm} を表 4.5.2 に示す。

加速電圧 2 MV の高エネルギー電子線線量測定に対しては PENELOPE の結果は 3364 eV、実測値（平均）は 3587 eV であった。シミュレーションと実測平均の差は 6.7% であり、これは校正時における測定不確かさ 2σ :11%（表 4.2）の範囲内であった。高エネルギー電子線の吸収線量は NPL にて校正された絶対線量であり、PENELOPE はこの絶対線量を測定不確かさの範囲内で再現していることがわかった。一方で、ULEB に対しては、50 kV で PENELOPE の結果は 1725 eV、実測値は 2036 eV、実験とシミュレーションの偏差は 4.5%、70 kV で同様に 13947 eV、実験値 12907 eV、14.7% であった。

表 4.4 電子 1 個あたりの Deposit Energy: E_D の実測値 E_{dm} と PENELOPE に よって計算された E_{ds} の比較

Deposit Energy per a Electron: E_D [eV]				
Acc.Volt	Experimental			PENELOPE
	Ave.	Max.	Min.	
50 kV	1998	2183	1829	1711
70 kV	12446	12713	12148	13005
2 MV	3587	3791	3409	3364

これら ULEB による 2 つの加速電圧の測定結果はいずれも測定の不確かさ 2σ の範囲内 であり、PENELOPE の結果は実測値を測定の不確かさ 2σ の範囲内で再現できること が判明した。

ULEB 線量測定において、測定される吸収線量は電子線照射の幾何学的構造によって 大きく影響されることは留意されるべきである。加速電圧 70 kV よりも 50 kV のほうが PENELOPE と実測値との偏差が大きい理由は、加速電圧が低いほど線量計表面に電子 が到達するまでに、電子線出射窓や照射雰囲気ガス中でそのエネルギーを失う割合が大き いため、わずかな照射ジオメトリの違い（電子線出射窓厚さ、照射距離）が測定結果に大 きな影響を与えるためである。

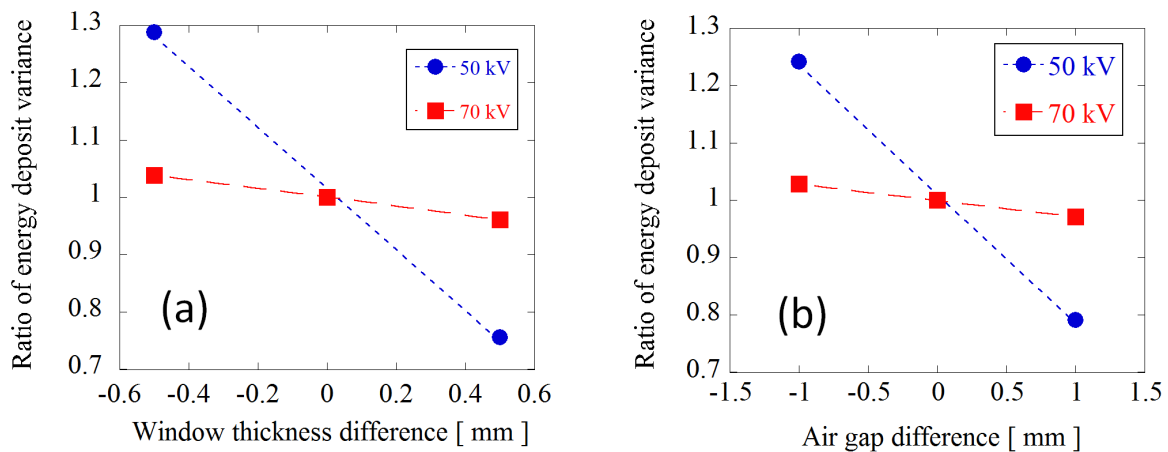


図 4.10 測定不確かさ内で電子線出射窓の厚さ (a) と照射距離 (b) を変化させた場合 における線量変化のシミュレーション結果

このことをシミュレーションで検証した結果を図 4.10 に示す。図 4.10 の横軸は電子 線出射窓の厚さ (a) と照射距離 (b) の変化量、縦軸は横軸のパラメータ変化量に対する FWT-60-810 線量計へのエネルギーデポジット量の変化率を表す。図 4.10(a) からは、加 速電圧 50kV の場合、電子線出射窓の厚さに $0.5\ \mu\text{m}$ の変動があった場合、シミュレ ーションされた線量は -30 % から +25 % まで変化することが判る。同様に、図 4.10(b) から は、窓と線量計表面との間の距離は 1.0 mm だけ変化しても、線量は最大 24.2 % で変化

することが判る。

加速電圧 70 kV 時において、10 mm から 30 mm までのエアギャップ距離に対する、シミュレーションと線量測定の結果を図 4.11 に示す。横軸がエアギャップ距離、縦軸は、電子線照射の単位電流当たりおよび単位照射時間当たりの吸収線量を表す。赤い菱形の各エラーバーは、測定不確かさの範囲 ($\sigma=1$) を表す。照射距離が大きくなるとシミュレーションと実測の偏差が大きくなる傾向があらわれている。これは、照射距離が大きくなると、線量計に入射する電子線のエネルギー分布は低エネルギー化し、阻止能が大きくなるため、わずかな距離の誤差が線量に大きな変動を与えるようになるためである。図 4.11 から、第 4 章における ULEB 線量測定では、実測のエアギャップ距離が実際には測定値よりも短かった可能性が示唆される。このように加速電圧の低下だけでなく、照射距離の拡大によっても測定不確かさが大きくなることは留意すべきである。

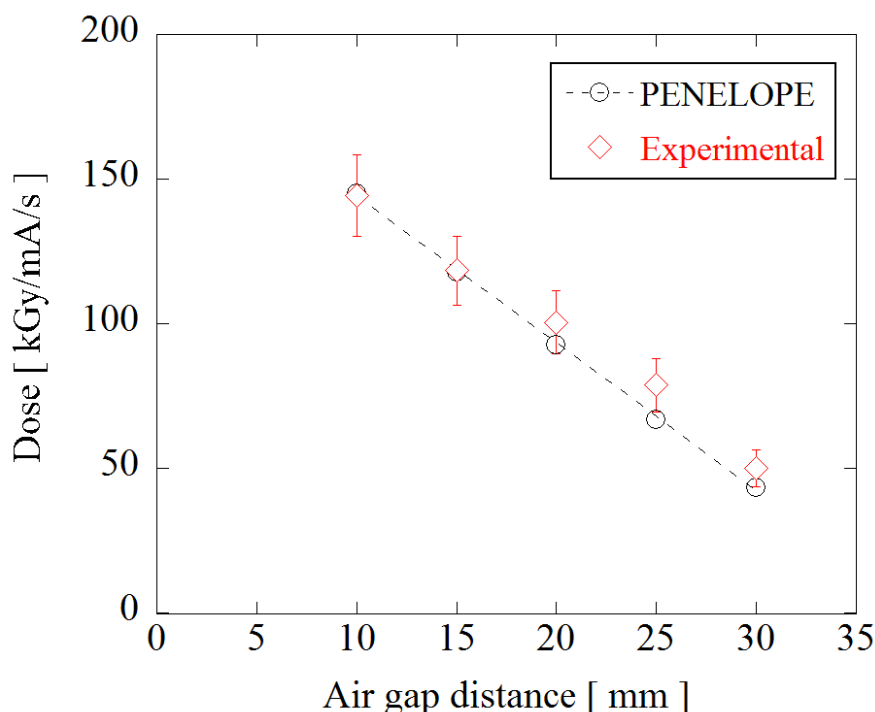


図 4.11 加速電圧 70 kV において照射距離を 10 mm から 30 mm まで変更したときの線量測定値 (赤菱形) とシミュレーション値 (青丸)

加速電圧 50kV と 70kV における ULEB 線量測定において、吸収線量算出に含まれる不確かさを、表 4.5 に示す。検討した不確かさには、線量測定システム、応答関数のフィッティング、加速電圧または管電流の設定、照射の幾何学的構造が含まれる。応答関数のフィッティングによる不確かさは、8.3 % であり、応答関数と高エネルギー実験時における各線量計の測定値との間の残差の標準偏差を考慮して計算された [?]。実験の幾何学的構造による不確かさは、照射構造に起因する窓箔厚さ、照射距離の測定誤差範囲を考慮し、これらのパラメータを変更した場合に吸収線量に与える影響を、PENELOPE によって計算した。今回の ULEB 線量測定実験における統合不確かさは、 $\sigma = 1$ でそれぞ

表 4.5 ULEB 線量測定実験における不確かさ

Components of uncertainty in the low energy electron beam dosimetry	50 kV(%)	70 kV(%)
1. Film dosimetry system		
1-1-1. Initial OD reading	3.7	3.7
1-1-2. Final OD reading	1.1	1.2
1-1-3. Thickness measurements	2.5	2.5
1-1 The overall uncertainty associated with the individual dosimetry. (1-1-1, 1-1-2, 1-1-3)	3.1	3.3
1-2 Temperature and humidity dependence		2.9
The overall uncertainty associated with film dosimetry system (1-1, 1-2)	4.3	4.4
2. Calibration curve fitting		8.1
3. Beam current setting		0.3
4. Irradiation geometry		
4-1. Window thickness	14.0	1.7
4-2. Air gap distance	16.7	2.3
Total uncertainty (1, 2, 3, 4)	23.6	9.7

れ 23.6 % (50 kV) と 9.7 % (70 kV) であった。

4.6 結果と考察

2 MV 電子線加速器による電子線照射で得られた FWT-60-810 線量計の応答関数を ULEB の吸収線量測定に適用し、測定結果とその不確かさを PENELOPE による計算結果と比較した。その結果、50 keV から 2 MeV までのエネルギー範囲において、PENELOPE の有効性が確認された。この結果に基づき、FWT-60-810 線量計による線量測定と PENELOPE を利用した工業用電子線照射プロセス設計法を示す。

4.6.1 PENELOPE の有効性

PENELOPE の計算結果は ULEB 照射プロセスの設計にも有効である。今回の実験結果と、PENELOPE で加速電圧を変化させたときのデポジションエネルギー E_{ds} の分布を図 4.12 に示す。図 4.12 の縦軸は FWT-60-810 線量計への 1 電子あたりのエネルギーデポジット、横軸は電子線加速電圧を表す。プロットは、菱形が表 4.5.2 の実験値であり、白丸は PENELOPE で計算された値である。2 MeV 電子線を利用した実験においては、校正された標準線量計の絶対線量に対して、PENELOPE の計算結果は実測値と不確かさ ($\sigma = 2$) の範囲内で一致した。一方、ULEB 照射実験においては、加速電圧が 50 kV から 70 kV に変化すると、FWT-60-810 線量計へのエネルギー付与量は一桁高くなる。PENELOPE はこの加速電圧領域において、加速電圧に対するエネルギー付与の急激な増加を定性的に再現しており、実験結果と不確かさ ($\sigma = 2$) の範囲内で定量的にも一致し

た。また、PENELOPE は、電子線に対して数 keV のエネルギーまでその効果が検証されている [16]。以上の結果より、PENELOPE によるシミュレーションが ULEB 照射領域での吸収線量評価にとって有効であり、工業用プロセスにおける電子線照射源のスペックや照射構造の検討など、設計パラメータの評価に利用できる。

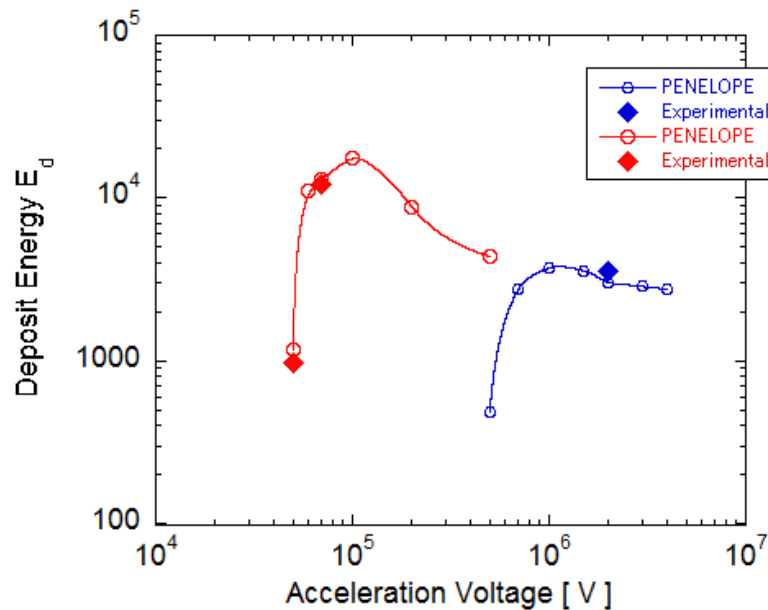


図 4.12 PENELOPE の計算結果と実測値

4.6.2 産業応用への提案

第 4 章の実験結果より、ULEB 照射プロセスを完了できる閾値線量が判明している場合は、線量測定結果とその不確かさ、シミュレーション結果に基づいた電子線照射パラメータの決定方法を提案することができる。図 4.13 において、縦軸は単一の条件での測定値に基づく搬送速度および電流に対応する換算線量を示す。各塗りつぶした四角いプロット上にあるエラーバーは、測定の不確かさ ($\sigma = 2$) に基づく 95 % の信頼区間を表している。それぞれの破線と白い菱形のプロットは、PENELOPE による計算結果を表している。もし照射物が立体的な形状を持っている場合には、照射距離は、照射される物体上において電子線出射窓から最も遠い距離が選択されるべきである。プロセスにおけるビーム電流および搬送速度は、測定値に対する採用された信頼区間の下限および上限が閾値線量を超えるように決定される。信頼区間の設定と測定不確かさの各要素は、プロセスに求める基準に応じて考慮する必要がある。通常、プロセス構造の設計が完了した後、電子線照射源側で加速電圧、ビーム電流などの照射パラメータを変更したり、搬送装置側で照射の幾何学的構造や搬送速度などを変更することは困難でありコストが大きい。第 4 章の研

究で得られた線量測定結果とその不確かさを考慮した PENELOPE 計算結果との一致性の検証結果により、設計の段階から確実にプロセスの実行可能性の検証が可能になる。

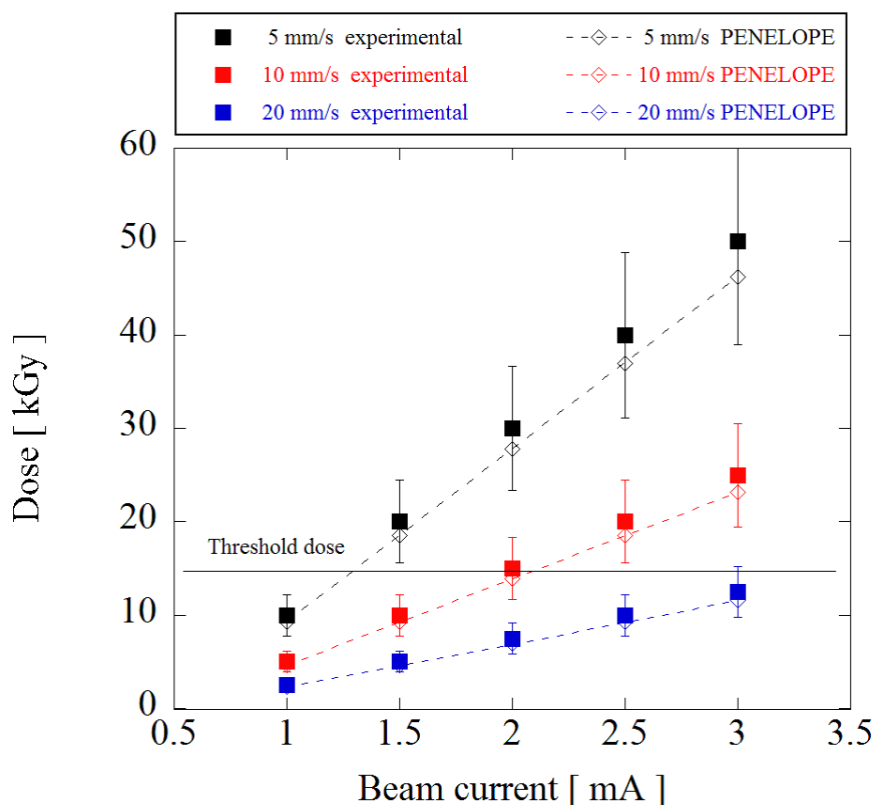


図 4.13 測定不確かさ ($\sigma = 2$) に基づいて信頼区間を設定する場合の吸収線量見積と照射パラメータ設計の例

4.7 第 4 章の結論

ULEB 線量測定において、高エネルギー電子線で校正した応答関数を適用することは、工業用電子線照射プロセスの設計、線量管理に有効である。2 MeV 電子線照射によってアラニン線量計を用いて校正された FWT-60-810 線量計の応答関数は、加速電圧 50 kV から 70 kV の ULEB 領域においても、10 kGy から 100 kGy の範囲（線量率は 50 kV で最大 72.8 kGy/s、70 kV は 343 kGy/s）において適用できる。PENELOPE によるシミュレーションは、加速電圧 2 MV から 50 kV の低エネルギーまで、FWT-60-810 線量計の吸収線量を測定不確かさの範囲内で再現できることがわかった。PENELOPE の計算結果と FWT-60-810 線量計による線量測定の結果、その不確かさをを用いることで、ULEB 照射プロセスの特徴である表面 μm レベルのエネルギー付与を見積もることが可能になり、工業用プロセスにおいて必要な線量、そのための照射機の性能（加速電圧、電流）、照射構造などの設計に利用することができる。この研究成果によって、ULEB 線量測定の信頼性が確保され、線量管理やプロセス設計をより確実に進めることが可能になり、ULEB 照射源の産業拡大に貢献できると考える。

第4章の参考文献・引用

- [1] S. Matsui, Y. Mori, T. Nonaka, T. Hattori, Y. Kasamatsu, D. Haraguchi, Y. Watanabe, K. Uchiyama, and M. Ishikawa, *Energy deposition evaluation for ultra-low energy electron beam irradiation systems using calibrated thin radiochromic film and Monte Carlo simulations* Review of Scientific Instruments **87**, 053309 (2016)
- [2] 放射線照射振興協会 大線量測定研究委員会編『工業照射用の電子線線量計測』地人書館 (1990) P.48
- [3] *Standard Practice for Use of Radiochromic Film Dosimetry System*, ISO/ASTM 51275 (2004)
- [4] *Electron Beam Irradiation Facility*, JAEA; <http://www.taka.jaea.go.jp>
- [5] Standard Guide for Selection and Calibration of Dosimetry System for Radiation Processing, ISO/ASTM 51261 (2002)
- [6] Standard Guide for Estimating Uncertainties in Dosimetry for Radiation Processing, ISO/ASTM 51707(2005)
- [7] Alanine reference dosimetry service for 1 MeV to 4 MeV industrial electron beams, <http://www.npl.co.uk>
- [8] *Using radiachromic dosimeters: Product Application Literature PAL-1*, FAR WEST TECHNOLOGY (2009)
- [9] *Operational Manual, MODEL FWT-92D RADIACHROMIC READER Rev.2B*, FAR WEST TECHNOLOGY (2005)
- [10] Baro, J., Sempau, J., Fernandez-Varea, J.M., and Salvat, F., *PENELOPE: An algorithm for Monte Carlo simulation of the penetration and energy loss of electrons and positrons in matter*. Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. B **100**, P31-46 (1995)
- [11] Salvat, Francesc and Fernández-Varea, José M and Sempau, Josep, *PENELOPE-2006: A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport*, Workshop proceedings, vol.7 (2006)
- [12] Sempau, Josep and Andreo, Pedro and Aldana, Judith and Mazurier, Jocelyne and Salvat, Francesc, *Electron beam quality correction factors for plane-parallel*

- ionization chambers: Monte Carlo calculations using the PENELOPE system*, Physics in medicine and biology, Vol.49, No.18, p4427 (2004)
- [13] Fernández-Varea, JM and Liljequist, D and Csillag, S and Rätty, R and Salvat, F, *Monte Carlo simulation of 0.1–100 keV electron and positron transport in solids using optical data and partial wave methods*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol.108, No.1, p35-50 (1996)
- [14] H.Hirayama, H.Namito, *THE EGS5 CODE SYSTEM*, KEK Report Number 2005-8 (2013)
- [15] Sempau, J and Fernandez-Varea, JM and Acosta, E and Salvat, F, *Experimental benchmarks of the Monte Carlo code PENELOPE*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol.207, No.2, p107-123, 2003
- [16] J.Sempau, J. M. Fernández-Varea, E. Acosta, and F. Salvat, Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. B **207**, 107 (2003)

第 5 章

ULEB 照射されたラジオクロミックフィルム線量計の深度線量分布測定

5.1 第 5 章の概要

加速電圧 43 kV~70 kV の ULEB 照射において、ラジオクロミックフィルム線量計の厚さよりも薄い層の相対線量を求める手法を評価した。評価は、ラジオクロミックフィルム線量計の応答に対し、シミュレーションによって計算された深度線量分布を適用することで行った。ラジオクロミックフィルム線量計を積み重ねることによって測定された相対深度線量分布は、シミュレーションで計算された深度線量分布と測定不確かさの範囲内で一致することを確認した。また、47 μm 線量計の応答にシミュレーションで計算された深度線量分布を適用して、線量計表面 11 μm の線量を推定した。結果は、11 μm 厚さの線量計の実測値と測定不確かさ ($\sigma = 2$) 内で一致した。さらに、照射源の加速電圧を調整することで、線量計表面のエネルギー付与深度を 4.4 μm から 22.8 μm まで変化させ、同様の評価をすることによって、線量計表面のより薄い層に対するこの手法の有効性を検証した。その結果、この方法は、ラジオクロミックフィルム線量計の表面からの深さ 4.4 μm まで有効であることが判明した。この線量計の厚さの範囲で検証されたシミュレーションによる相対深度線量分布を使用することで、数 μm 単位での正確な線量評価が可能になり、工業用 ULEB プロセスの設計精度を向上させることができる。[1]

5.2 第 5 章の研究背景と目的

5.2.1 研究の背景

第 4 章において、ULEB 線量測定におけるラジオクロミックフィルム線量計とモンテカルロシミュレーションの適用性を議論したが、工業用プロセスにこの成果を応用するには課題が残っている。ULEB は物質中で厚さ数 μm から数十 μm の飛程を持ち、その入射方向（すなわち被照射物の深さ方向）に対して、 μm 単位でその線量が急峻に変化して

いく深度線量分布を持つ。この μm 単位の厚さレベルでの改質が求められる印刷、コーティング硬化、表面滅菌などへの ULEB 適用が拡大している [2, 3] 一方で、その照射プロセスの設計や、プロセスを経て生産される製品の品質管理のためには、照射された電子線が対象物の深さ方向に対してどのように線量が付与されているかを正確知ることが求められている。すなわち、工業用 ULEB プロセスでは、 μm 単位の線量測定技術が求められている。

第 4 章で述べた通り、ULEB 線量測定は、ラジオクロミックフィルム線量計を用いるのが一般的であるが、この場合、線量計内部に生じる深度線量分布に起因する問題がある。一つ目の問題は、市販のフィルム線量計はその厚さが $10 \mu\text{m}$ から数十 μm であり、ULEB の飛程と同程度か大きいことである。このような線量計に ULEB が入射すると、線量計の厚さ方向にわたって非均一な線量分布となり、線量計内部の厚さ領域によって線量が異なる。PENELOPE で計算された電子加速電圧 50 kV , 70 kV , 2 MV に対するフィルム線量計内の深度線量分布を図 5.1 に示す。縦軸はその深度位置における電子 1 個あたりからのエネルギー付与量を密度で除したものであり、横軸は線量計表面からの深さを表す。図 5.1 より、フィルム表面 $0 \mu\text{m}$ 付近における線量は、加速電圧 70 kV が、同 2 MV の約 5 倍になっていることが分かる。また、深度線量分布は、加速電圧が 2 MV のときはほぼ平坦なのに対して、 70 kV は最表面 $1 \mu\text{m}$ と最深部 $1 \mu\text{m}$ のエネルギーデポジットの比が 1.22、 50 kV では 5.68 と大きな勾配を持つ。 50 kV ではフィルム表面 (深さ $0 \sim 5 \mu\text{m}$) の吸収線量がフィルム深部 (深さ $5 \sim 12 \mu\text{m}$) に対して 3 倍近いことを表している。

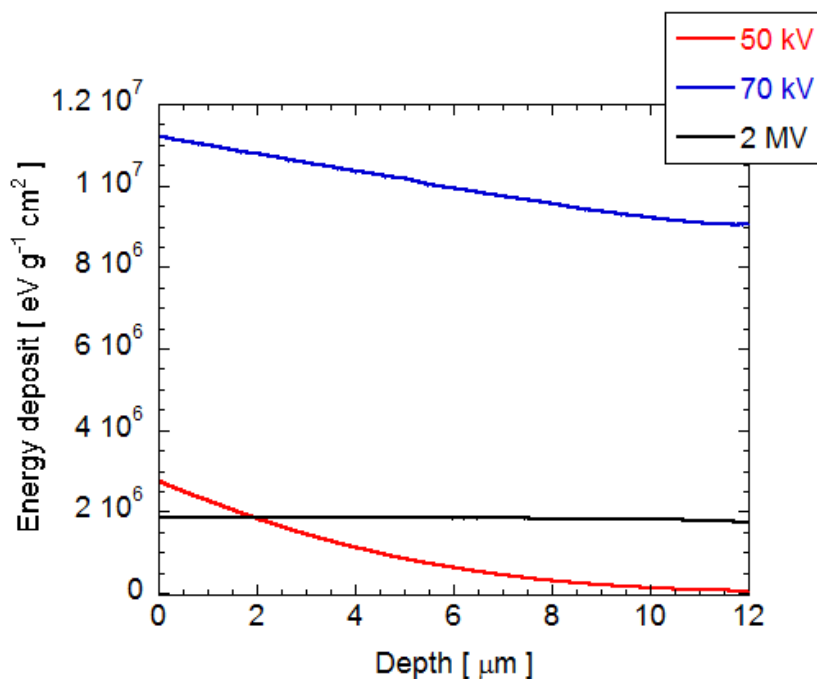


図 5.1 PENELOPE により計算されたフィルム線量計内の深度線量分布：赤 50 kV 、青 70 kV 、黒 2 MV

線量計の応答は線量計の厚さ全体で積算されて測定されるため、この応答から換算される線量は、フィルム厚さ全体で平均化された線量を表す。このため、線量計内で不均一な深度線量分布がある場合には、表面付近の線量に対しては過小に、深部に対しては過大に線量が評価されることになる。したがって、ULEB プロセスで線量を評価したい厚さ領域よりも線量計のほうが厚い場合には、所望する評価領域の線量はフィルムの応答だけでは知ることが出来ない。

もう一つの問題は、線量計応答を吸収線量に換算する応答関数に起因するものである。線量計の応答関数は、測定可能な線量計の応答と、それに対応する吸収線量の関係を示すものである。その線量計応答と吸収線量の関係が式 (4.2) で与えられるように非線形であり、かつ線量計内部に不均一な深度線量分布が発生した場合、線量計厚さ全体で積算された応答から換算される吸収線量値は、同じ線量が一様な線量分布で与えられた場合とは異なる。この問題は Helt-Hansen らの先行研究にて報告されており、真の線量 D_{ave} に対し、上記線量計内部の深度線量分布を考慮しない線量を見せ掛けの線量 (apparent dose) D_{app} と呼ばれている [4, 5]。図 5.2 はこの問題を説明したものであり、第 4 章で取扱った ULEB 照射による吸収線量は、この見せ掛けの線量 D_{app} である。ULEB 照射プロセスがさらに普及するためには、これらの線量計内の不均一な深度線量分布がもたらす問題を解決し、市販の線量計によって簡便に数 μm 単位での任意の厚さ領域の線量を評価できる手法が求められる。

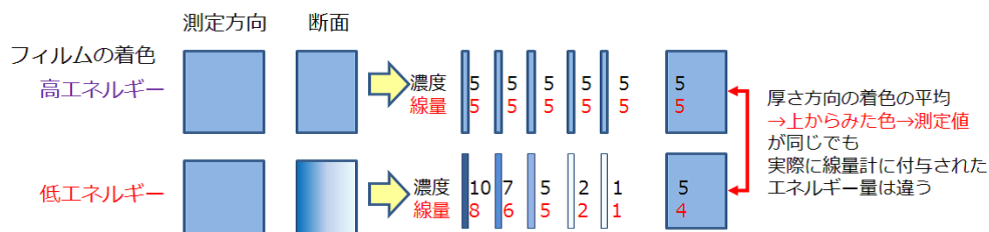


図 5.2 応答関数の非線形性と線量計内の不均一な深度線量分布がもたらす問題

100 keV 以下の電子線の線量測定に関する研究は、Helt-Hansen らによってフィルム線量計を絶対線量として校正し、実測した深度線量分布を適用する研究が報告されているが、70 keV 以下の電子線に関して、フィルム線量計内部の深度線量分布の問題を解決しようとした研究は報告されていない。Helt-Hansen らは、カロリーメータを用いて最低エネルギー 80 keV まで幾つかのフィルム線量計を校正した [6]。また、薄い線量計を積層させることによって深度線量分布を実測し、この実測された深度線量分布を用いて、線量計表面 $1 \mu\text{m}$ の水相当線量 (D_μ) を求める手法を提案している [5]。この手法を ULEB まで拡張しようとする場合、絶対線量として市販のラジオクロミックフィルム線量計を校正しようとすることは、ULEB プロセスの現状においては実用的ではない。なぜなら、第 4 章で述べたように、ULEB は照射距離によって電子エネルギー分布が大きく変化するため、照射面に凹凸があり、被照射物表面で照射距離が変わる場合、厳密には照射条件毎に校正

Irradiation parameters	HAMAMATSU EB-ENGINE
Acceleration voltage	43 - 70 kV
Beam current	3 -8 mA
Extended beam	Scanned
Beam exit window	Aluminum 10.5 μm
Air gap distance	10 mm
Conveyor speed	5 mm/s - 100 mm/s

表 5.1 実験に用いた ULEB 照射装置の照射パラメータ

が必要になってくる。また、薄いフィルム線量計を積層して深度線量分布を実測しようとしても、1枚のフィルム線量計の厚さ内で線量分布をもってしまうため、応答関数の非線形性による見せ掛けの線量の問題により、正確な深度線量分布を得ることは難しい。このような問題から、70 keV 以下のエネルギー領域においては、その飛程と同程度の任意の厚さ領域の線量を評価する手法が検証されていないのが現状である。

5.2.2 研究の目的

第5章で行う研究の目的は、高エネルギー電子線で校正されたラジオクロミックフィルム線量計の応答と、シミュレーションにより得られた線量計内の深度線量分布を用いて、線量計厚さの制約なく工業用 ULEB プロセスに必要な数 μm ～数十 μm 範囲の相対的な線量分布を求める手法を検証することである。絶対線量でなく相対的な線量分布を得る手法であっても、数 μm 単位の任意厚さ領域で、所望する被照射領域の深度線量分布を知ることが工業用 ULEB プロセス設計では求められる。シミュレーションは、様々な照射条件においてその深度線量分布を簡便に知ることが出来る手段であり、シミュレーションの深度線量分布の適用範囲が確認できれば、深度線量分布は容易に得ることが可能になり、プロセス設計効率を向上させることができる。第5章の実験では、厚さの異なる2種類のラジオクロミックフィルム線量計を用いて、加速電圧 43 kV から 70 kV の電子線照射による吸収線量実測値にシミュレーションで得た深度線量分布を適用することによって、線量計内部の相対的な深度線量分布の有効範囲を確認することを目的とする。

5.3 第5章で行う実験の構成

ULEB 照射実験では、浜松ホトニクス株式会社製 EB-ENGINE[®] を照射源とし、FWT-60 線量計の ULEB 照射に対する応答に、モンテカルロシミュレーションコード PENELOPE[7, 8, 9] で計算された規格化深度線量分布曲線を適用した。ULEB 照射源のスペックと照射構造を表 5.1 および図 5.3 に示す。加速電圧を 43 kV, 50 kV, 60 kV, 70 kV と変化させることで、深度線量分布を図 5.4 のように変化させた。図 5.4 の縦軸はその深度位置における電子1個あたりからのエネルギー付与量を密度で除したものであり、

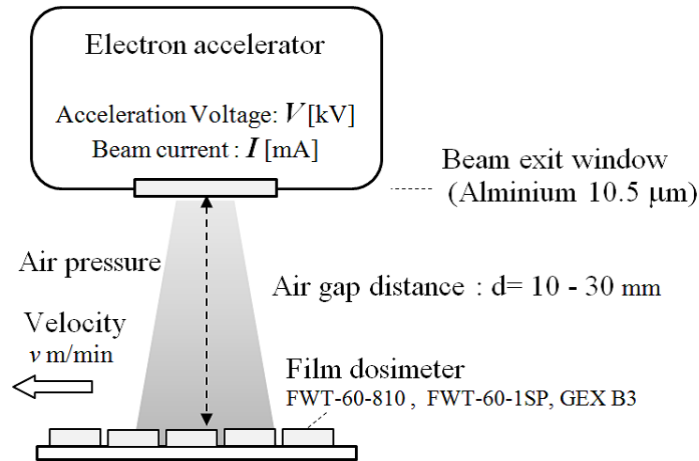


図 5.3 ULEB 線量測定実験の模式図

最表面の値で規格化している。横軸は線量計表面からの深さを表す。ラジオクロミックフィルム線量計は、FWT-60-810 (厚さ $11.5 \mu\text{m}$) と FWT-60-1SP (厚さ $47.5 \mu\text{m}$) の 2 種類を使用した。実験に使用された全ての線量計は、厚さと初期 OD 値を個別に測定し採用することで、個々の線量計の初期特性の違いを補正した。線量計の応答関数は、高エネルギー電子線と、国家標準までトレーサブルな線量計測が可能な基準線量計 (アラニン線量計) によって第 4 章と同じ手法で求められた。

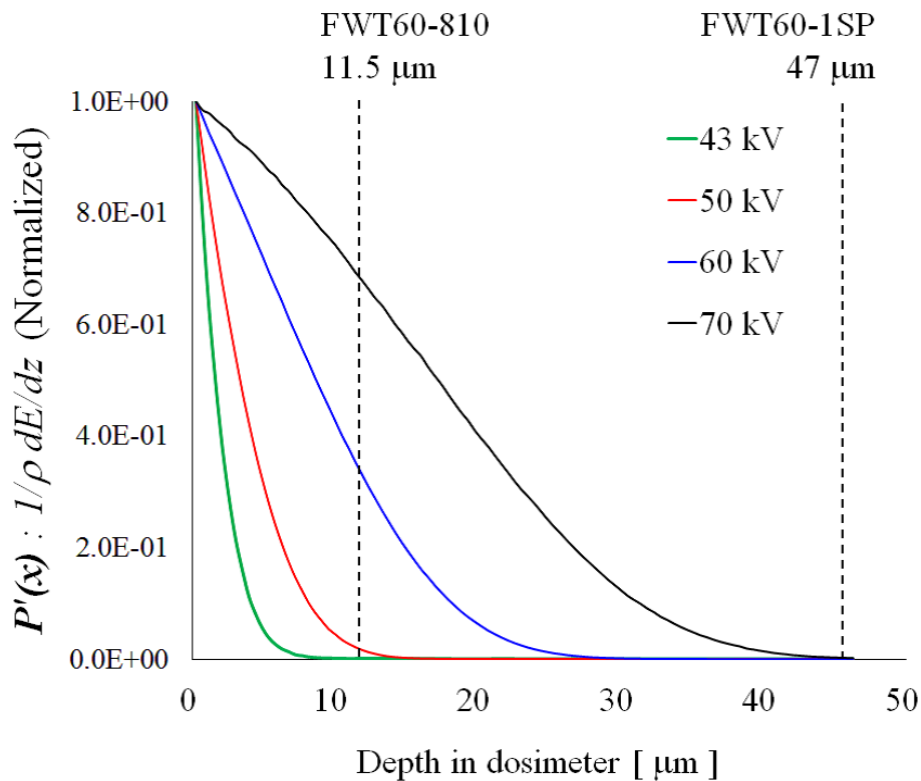


図 5.4 最表面で規格化された FWT-60-1SP 線量計 ($47 \mu\text{m}$ 厚さ) 内部の深度線量分布, $P'(x)$

シミュレーションで得た深度線量分布は線量計厚さの 1/100 の厚さをもつ副層単位で計算され、最表面の副層の値で規格化したものを適用した。すべての実験において、ULEB 照射後の線量計応答は、先行研究 [4, 5] に記載されたプロセスに従い、線量計内の深度線量分布と応答関数の非線形性に起因する吸収線量の補正が行われた。

5.4 応答関数非線形性の補正プロセス

図 5.4 に PENELOPE で計算した加速電圧と照射距離別における FWT 線量計 (FWT-60-1SP: 厚さ 47.5 μm) の内部における電子線照射軸方向の線量分布を示す。横軸は線量計の深さ（電子線照射軸）方向、縦軸は線量計に付与されたエネルギー量を最表面の値で規格化したものである。70 kV 以下の加速電圧の場合、最も薄い 11 μm の線量計 (FWT-60-810) を用いても、線量計の深さ方向内で急峻な分布をもつことがわかる。線量計の応答は厚さ方向で積算されたものであるため、このような場合、線量計応答を非線形な応答関数に代入することによって得られる線量は、その深度分布が均一であった場合の同じ応答値に対応する見せかけの線量 D_{app} であり、線量計の真の吸収線量 D_{ave} とは異なる [4, 5]。このため、深度線量分布と応答関数の非線形性を考慮し、線量計応答を補正する必要がある。深度線量分布を用いた応答の補正は文献 [4, 5] を参照し、その手続きを踏襲した。

深度線量分布は、第 4 章と同じように PENELOPE によって円筒座標系で近似した照射構造において計算された。PENELOPE によって、線量計の深さ位置 x において、線量計全体厚さの 100 分の 1 の厚さをもつ副層に対する単位厚さあたりの電子 1 個のエネルギー付与量を密度で除した値の分布として $P(x_i)$ が出力された。得られた深度線量分布 $P(x_i)$ を最表面の副層の値で規格化した、規格化深度線量分布 $P'(x_i)$ を求め、この $P'(x_i)$ を全副層で平均した値 P'_{ave} を求める。(図 5.5(a)) ここで、線量計における真の吸収線量（現時点で未知）を D_{ave} としたとき、この D_{ave} を実現する深度線量分布 $D(x_i)$ は、 D_{ave} 、 $P'(x_i)$ 、 P_{ave} を用いると次のように表される。(図 5.5(b))

$$D(x_i) = P'(x_i) \times \frac{D_{ave}}{P'_{ave}} \quad (5.1)$$

この $D(x_i)$ により、線量計の深さ x にある副層毎の吸収線量分布が得られる。この各副層の吸収線量値に対応する線量計の応答値を、校正によって得られた応答関数 $R(D)$ により求めていく。本研究で用いる応答関数は、 $k = aD^b$ の形で表され、 a 、 b は校正により得られた定数である。線量計の応答値 k は全ての線量計で $k = \frac{\Delta OD}{t}$ で表される。各副層の吸収線量を応答 k に変換するために、シミュレーションにおける線量計全厚さと副層厚さの比 $1/N$ を掛けて、各副層 x_i における応答値 $R'(D(x_i))$ を求めた。ここで $N=100$ である。

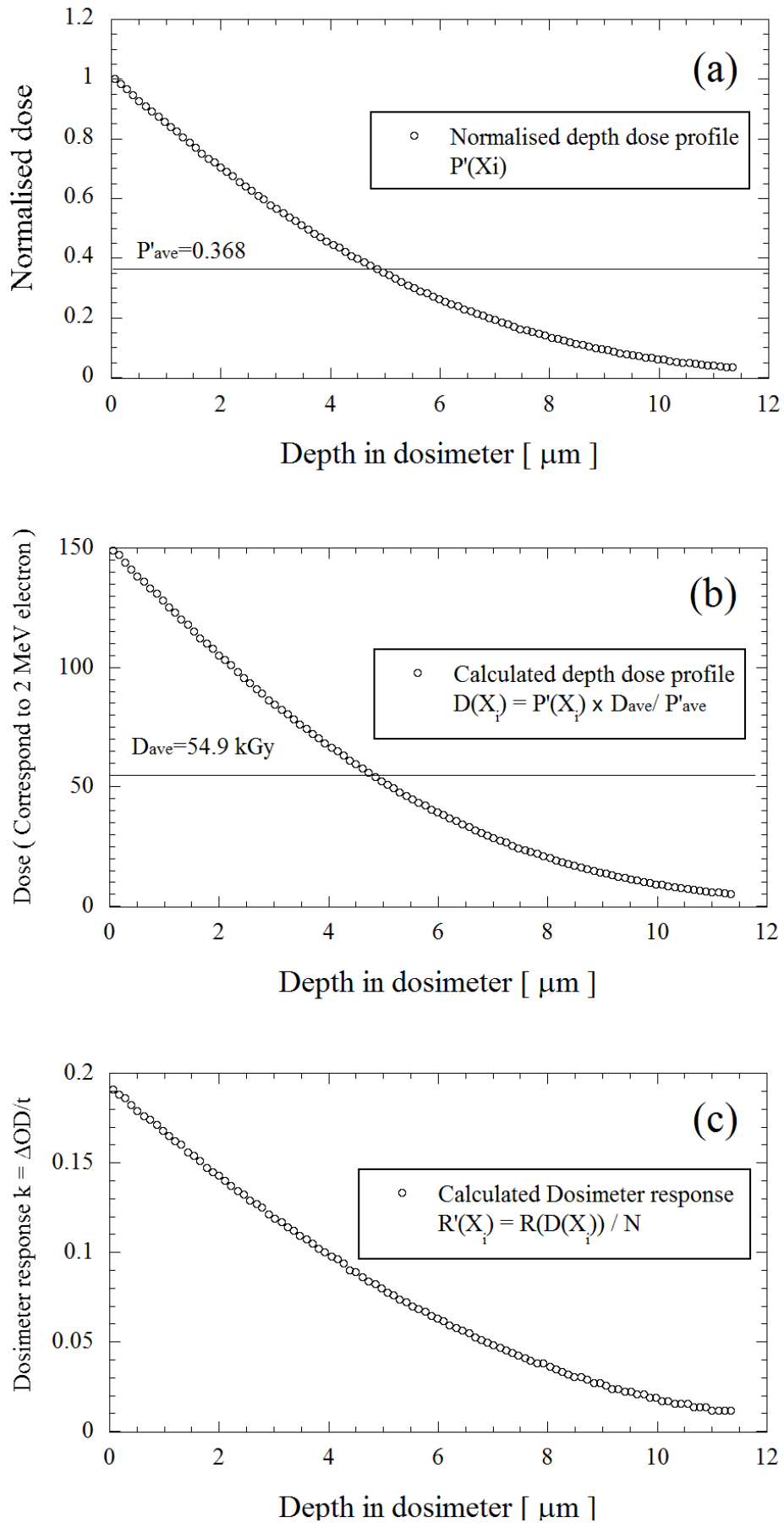


図 5.5 線量計内の深度線量分布と応答関数非線形性に起因する見せ掛け線量 D_{app} を平均線量 D_{ave} に補正する計算プロセス

$$R'(D(x_i)) = \frac{R(D(x_i))}{N} \quad (5.2)$$

$R'(x_i)$ は、深さ x_i における副層の線量計応答 k の分布を表す (図 5.5(c))。次に、線量計厚さ全体にわたって $R'(x_i)$ を積算することで、実際の測定で得られるフィルム全体の応答 k' が求められる。この積算応答 k' をそのまま応答逆関数 $R^{-1}(x_i)$ に代入して求められる吸収線量値は、フィルム線量計の真の吸収線量 D_{ave} ではなく、線量計内の深度線量分布と応答関数の非線形性がもたらす見せかけの線量値 D_{app} である。

$$D_{app} = R^{-1}\left(\sum_{i=1}^N R'(x_i)\right) \quad (5.3)$$

このようにして、測定可能な範囲内で複数の D_{ave} に対応する D_{app} を求め、 D_{app} と D_{ave} の関係を求める。

$$D_{ave} = \eta D_{app} \quad (5.4)$$

この η を感度補正係数という。第 5 章の研究では線量計が校正された吸収線量の範囲内で複数の線量値に対して D_{app} と D_{ave} を求めることで、各条件の感度補正係数 η を決定し、 D_{app} を D_{ave} に変換した。以下の第 5 章の実験において線量計応答から得られる線量はすべて、上記手法により D_{app} から D_{ave} への変換を行っている。

5.5 実験における測定不確かさ

表 5.2 に今回の測定と線量算出における不確かさの構成要素を加速電圧 70 kV、50 kV、いずれも照射距離 10 mm の条件を例に表す。すべての実験は各測定を 5 枚の線量計で行っており、OD 値の測定、厚さの測定の不確かさがラジオクロミックフィルム線量計の吸収線量に与えた影響は、各照射バッチに使用された 5 枚の線量計の吸収線量値の標準偏差を採用した。応答関数を得るための校正時と、今回の実験における温度湿度によるフィルム線量計感度の影響も考慮された。フィルム線量計の温度湿度依存性は参考文献 [12, 13] のデータに基づいている。応答関数の非線形性の補正、および深度線量分布の算出においては、シミュレーションで設定した照射ジオメトリと実際の照射ジオメトリの差、および照射源の変動が、結果として出力される深度線量分布とそれに基づいて計算される感度補正係数 η への影響として現れる。例として、図 5.6 に、出射窓厚さの偏差が原因による、シミュレーションの深度線量分布計算結果への影響を示す。このような深度線量分布の大きな変化の要因となるのは加速電圧の出力誤差、出射窓厚さの測定誤差、照射距離の測定誤差である。これら各要因がもつ不確かさの範囲を決定し、シミュレーション

によって深度線量分布の変化を計算し、それに伴う応答関数非線形性補正（全ての実験）、 $D_{11\mu m}$ 線量（実験 2）への影響を不確かさ要素として考慮した。

表 5.2 より、総じて不確かさは加速電圧が低くなるほど、または照射距離が広くなるほど大きくなるのがわかる。これは、線量計に入射する電子が低エネルギー化することにより、侵入深度に対する線量の勾配が大きくなるため、わずかな照射ジオメトリのずれが大きな差をもたらすためと考えられる。

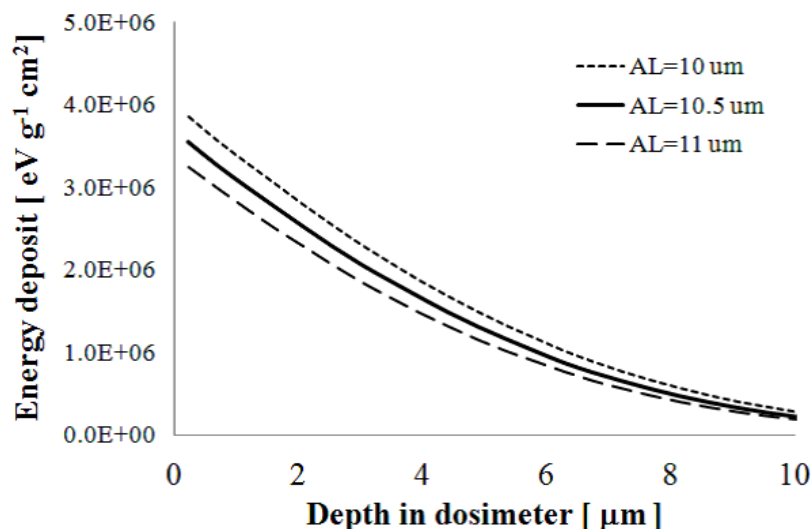


図 5.6 出射窓の厚さが変化した場合における、線量計内部の深度線量分布の変化の例

5.6 シミュレーションで得た深度線量分布の検証実験

ラジオクロミックフィルム線量計の応答とシミュレーションによって得られる深度線量分布を利用することで、線量計の内部の厚さ方向の相対的な線量分布を得る方法を実験にて検証した。まず、積層した 4 枚の FWT-60-810 線量計によって $11\ \mu\text{m} \sim 45\ \mu\text{m}$ の範囲の深度線量分布を実測し、シミュレーション結果と比較した（実験 1）。次に FWT-60-1SP 線量計の応答とシミュレーションで得た深度線量分布から FWT-60-810 線量計の線量を予測し、FWT-60-810 線量計の実測値と比較することでこの手法の有効性を検証した。（実験 2）さらに実験 2 は加速電圧を変更することでフィルム線量計内に発生する深度線量分布を変えて行い、 $11\ \mu\text{m}$ よりも薄い領域の有効性についても議論する。

5.6.1 深度線量分布有効性の検証 1：積層フィルム

薄いフィルム線量計を積層させることで、 $11\ \mu\text{m} \sim 45\ \mu\text{m}$ の厚さ領域の深度線量分布を実測し、PENELOPE で計算される深度線量分布の有効性を検証した。図 5.7 のように、4 層に積層した FWT-60-810 線量計に ULEB を照射した。加速電圧は第 4 層まで十

表 5.2 シミュレーションによる深度線量分布を用いた線量補正をする場合における不確かさ

Components of uncertainty	FWT-60-1SP	
	50 kV	70 kV
1. Dosimeter response measurements		
Film dosimeter reading	4.7%	2.6%
Temperature and humidity dependence	3.5%	3.5%
Curve fitting for the response function	1.9%	1.9%
Overall uncertainty (1 s.d.)	6.1%	4.7%
2. Irradiation source instability		
kV output	4.1%	0.44%
mA output	0.50%	0.50%
Overall uncertainty (1 s.d.)	4.1%	0.67%
3. Dose modifying by simulated depth dose distribution		
Correction for non-linearity of response function		
Dispersion of beam exit window thickness	0.36%	0.14%
Dispersion of irradiation distance	0.71%	0.30%
Dispersion of acceleration voltage	2.7%	0.18%
Overall uncertainty (1 s.d.)	2.8%	0.37%
4. Dose estimation for $D_{ave47-11}$		
Dispersion of beam exit window thickness	0.14%	1.4%
Dispersion of irradiation distance	0.51%	2.5%
Dispersion of acceleration voltage	0.31%	0.97%
Overall uncertainty (1 s.d.)	0.53%	2.9%

分に線量を与えるために 70 kV とし (図 5.4)、電子線出射窓表面から線量計表面までの照射距離は 10 mm とした。各層のフィルムは 1 cm 間隔で 5 点、応答 (OD 値) と線量計厚さを測定し、見せ掛け線量 D_{app} および応答非線形性を考慮した補正を行った D_{ave} を求め、5 点の平均値を各層の代表値として採用した。PENELOPE で計算された深度線量分布は、第一層の中間厚さ (5.5 μm) の値で規格化され、実測値と比較した。

PENELOPE で計算された相対深度線量分布は、積層した FWT-60-810 線量計の各層の線量値から得られた線量分布と測定不確かさ 2σ の範囲内で一致した。PENELOPE で計算された深度線量分布と実験結果をプロットしたものを図 5.8 に示す。縦軸は各層の吸収線量を最表面の第 1 層の線量で規格化したものであり、横軸は第 1 層の線量計表面からの深さである。測定不確かさは線量計の応答値に依存するため、各層の線量値に対応する不確かさを採用している。今回の実験における測定の不確かさ要素は表 5.2 に表された、1, 2, 3 であり、それらの統合不確かさは 5.84 % であった。PENELOPE で計算された深度線量分布は、11 μm から 44 μm の厚さ領域において、測定不確かさの範囲内で実測

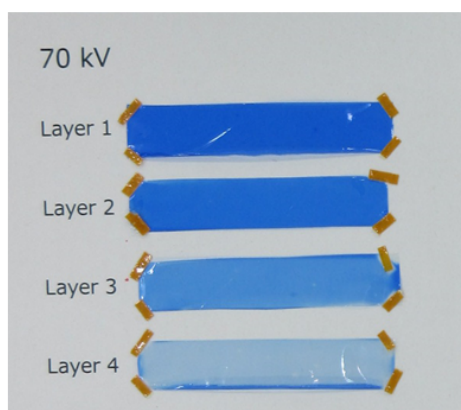
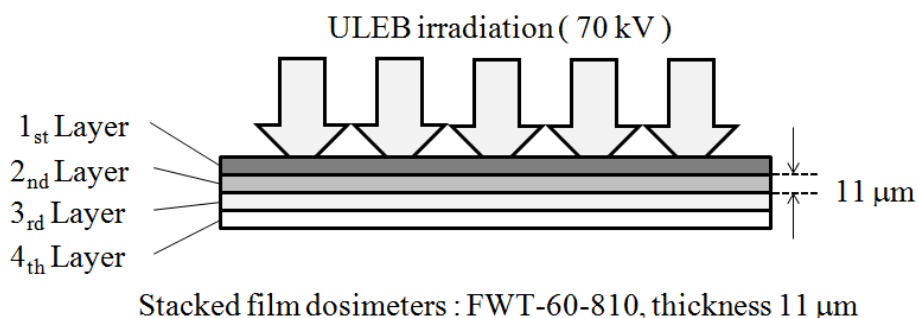


図 5.7 実験 1 ; 照射構造 (上)、積層して照射された後に 1 枚ずつ引き剥がされた線量計 (下)

値を再現できていた。

5.6.2 深度線量分布有効性の検証 2 : 47 μm 線量計と 11 μm 線量計

5.1 の結果に基づき、厚い線量計 (47 μm) の応答と PENELOPE で計算された深度線量分布を利用して、線量計よりも薄い領域の線量を予測できるかどうかを、薄い線量計 (11 μm) の実測値と比較することで検証した。まず、ULEB を照射した FWT-60-1SP 線量計の応答から見せ掛けの線量 D_{app47} が得られ、 D_{app} に PENELOPE で計算された深度線量分布 $P(x)$ を適用することで、5.4 章のプロセスに則って D_{ave47} を求める。PENELOPE で計算された深度線量分布 $P(x)$ は、最表面の複層の値で規格化し $P'(x)$ とし、 $P'(x)$ の 47 μm までの全区間の複層に対する平均値 P'_{ave} を求めた。この P'_{ave} を D_{ave47} と一致させるように、規格化深度線量分布 $P'(x)$ に D_{ave47}/P'_{ave} を掛けてえられるのが、深さ x_i にある副層の吸収線量を表す $D(x_i)$ であり、 $D(x_i)$ の全ての複層の平均は D_{ave47} に一致する。(図 5.9) この $D(x_i)$ の値を表面から 11.5 μm の深さまで平均すると (図 5.9)、同じ材料の線量計でその厚さに対応する吸収線量 $D_{ave47-11}$ を求めることができる。この方法で FWT-60-810 線量計に相当する 11.5 μm 厚さの線量 $D_{ave47-11}$ を求め、実測された D_{ave11} と比較した。

47 μm 厚さの FWT-60-1SP 線量計の応答に、PENELOPE で計算された深度線量分布を適用することで得られた線量計内部の深度線量分布 $D(x_i)$ から計算された 11 μm 厚さ分の線量 $D_{ave47-11}$ は、11 μm 厚さの FWT-60-810 線量計の実測値 D_{ave11} と測定不

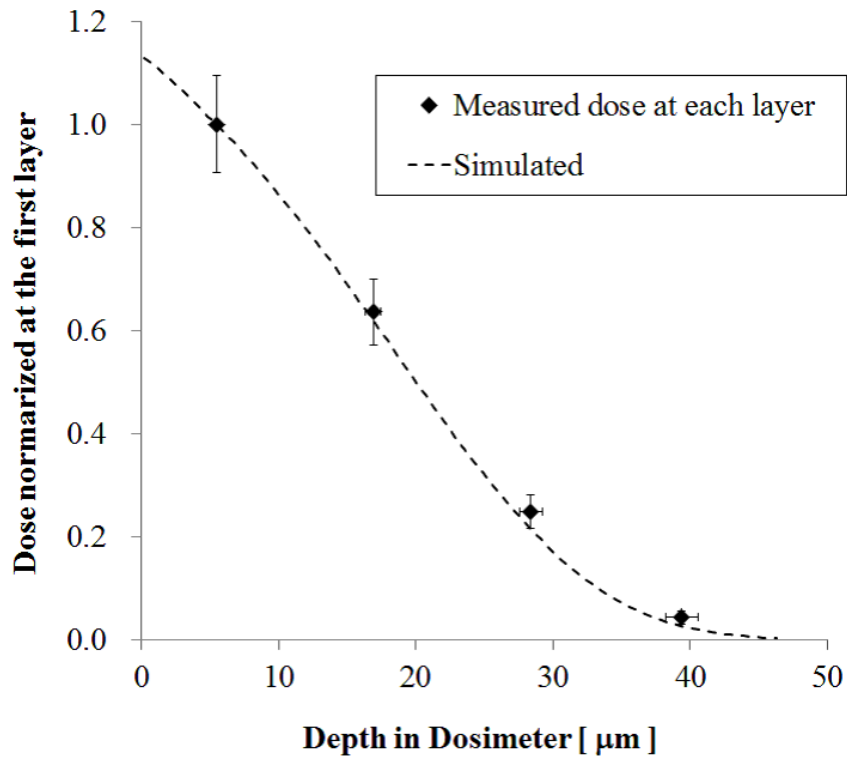


図 5.8 積層されたフィルム線量計の最上層の中間点で規格化された、線量計内深さに対する線量分布：破線はシミュレーション、プロットが実測値

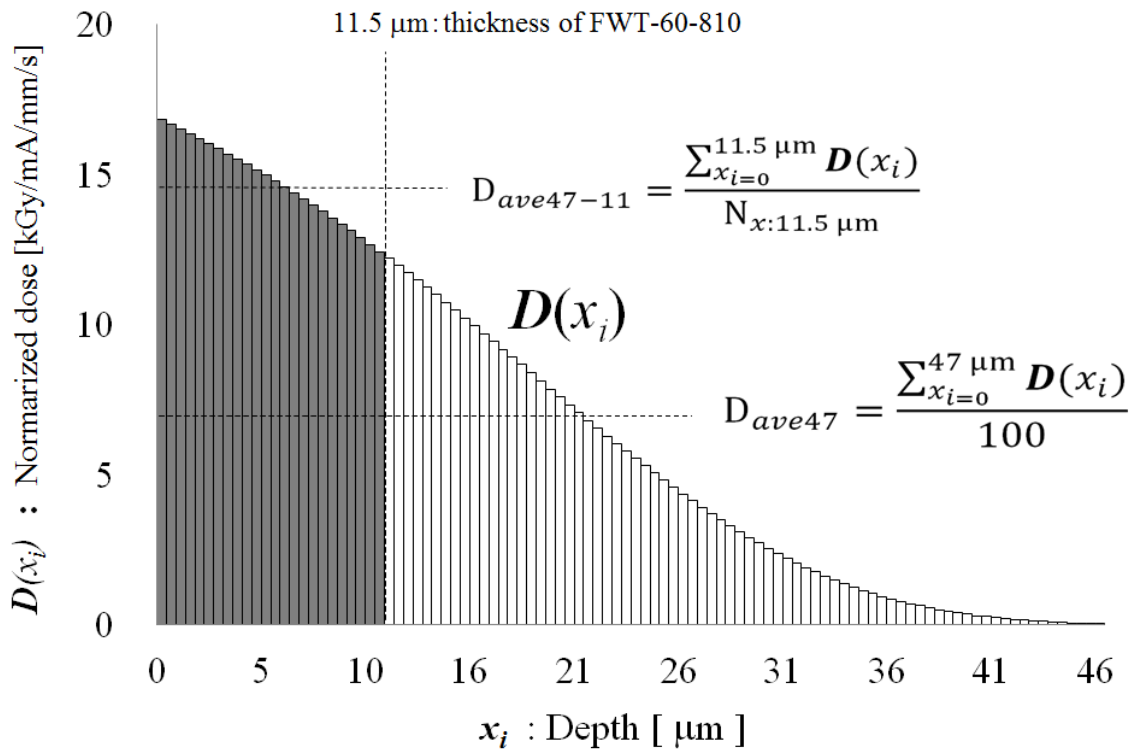


図 5.9 規格化深度線量分布と 47 μm 線量計の応答から 11 μm 線量計の応答 $D_{ave47-11}$ を推定するプロセス

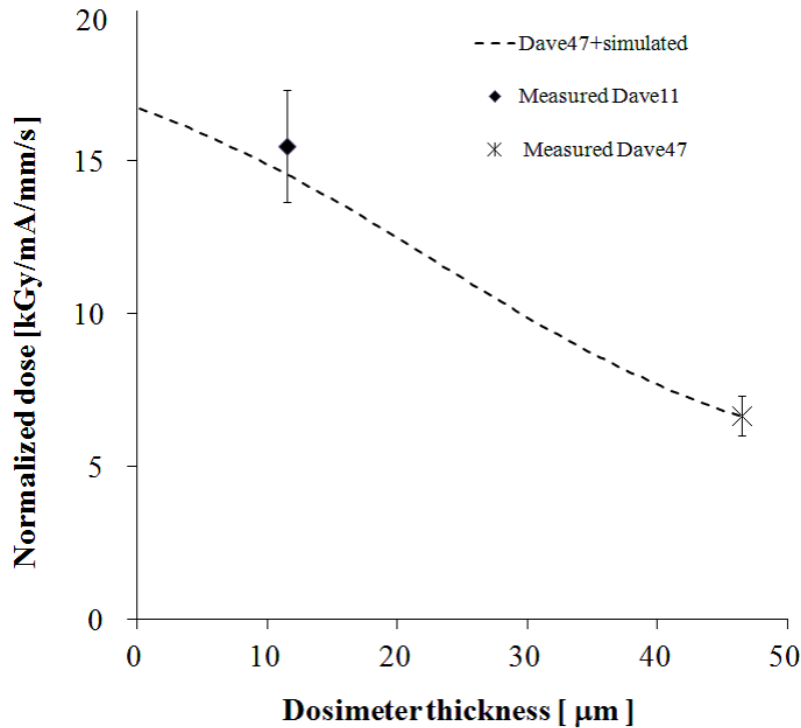


図 5.10 規格化深度線量分布と 47 μm 線量計の応答から求めた $D_{ave47-11}$ と 11 μm FWT-60-810 線量計の実測値 D_{ave11}

確かさ 2σ の範囲内で一致した。実験結果を図 5.10 に示す。図 5.10 の縦軸は単位照射量あたりの吸収線量、横軸は線量計の厚さである。×印は 1SP 線量計の応答にシミュレーションの深度分線量分布を適用し、応答補正を行った線量 D_{ave47} を表す。破線は図 5.9 の $D(x_i)$ を利用して求める厚さ x_i の線量計の D_{ave} に対応する $\sum \frac{D(x_i)}{N_i}$ を示している。各副層の線量を表す $D(x_i)$ は表面から単調減少する分布のため、平均化される厚さ領域が表面付近に向かって薄くなるほど区間平均線量は大きくなる。ダイヤは 810 線量計の実測値から得られた D_{ave11} であり、エラーバーは測定不確かさ ($\sigma = 2$) を表す。1SP 線量計の応答と PENELOPE の深度線量分布に基づいて得られた $D_{ave47-11}$ は、測定不確かさ 2σ の範囲内で 810 線量計の実測値 D_{ave11} に一致した。PENELOPE によって計算される深度線量分布を 1SP 線量計の応答に適用することで、FWT-60-810 線量計の線量を測定不確かさの範囲内で再現できることが判った。

ULEB プロセスに求められる数 μm レベルの領域まで本手法の有効性を検証するために、同様の実験を電子線の加速電圧を変えることで線量計へのエネルギー付与の深さをより浅くすることにより行った。その結果、全ての条件において $D_{ave47-11}$ と D_{ave11} は測定不確かさ 2σ の範囲内で一致した。エネルギー付与の深さは、図 2 に示された各加速電圧の深度線量分布に対して、47 μm 全体に付与されるエネルギー量の 95% が付与される深さで定義した。電子エネルギー 70 keV 以下では、図 5.4 より、フィルム表面にエネ

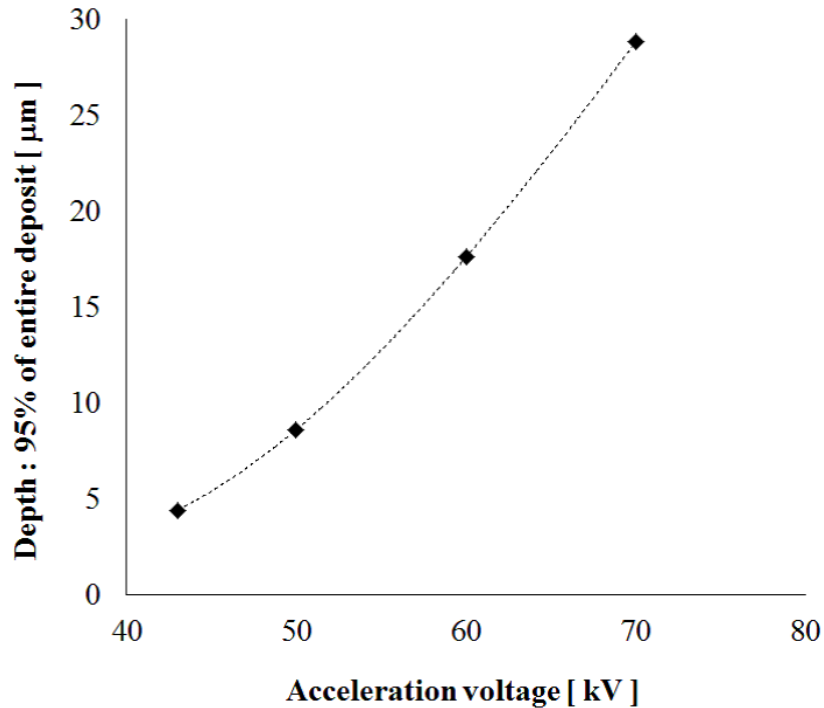


図 5.11 線量計に付与されるエネルギーが全体の 95% になる深さと加速電圧の関係

ルギーの大半を付与するため、フィルム厚み $47 \mu\text{m}$ 全体に付与されるエネルギー量は、フィルム厚みを無限大としたときのフィルム全体に付与されるエネルギー量と同等とみなしてよい。図 5.11 は、加速電圧 60 kV , 50 kV , 43 kV に対して横軸に加速電圧、縦軸に上記エネルギー付与深さでプロットしたものであり、エネルギー付与深さは 50 kV で $8.6 \mu\text{m}$, 43 kV で $4.4 \mu\text{m}$ である (60 kV で $17.6 \mu\text{m}$, 70 kV で $28.8 \mu\text{m}$)。この結果から、 43 kV , 50 kV での照射においては大部分のエネルギーが付与されている領域が線量計厚さよりも薄いため、本手法の有効性評価を線量計の厚さ以下に拡張できると考えた。

前節と同じ実験を加速電圧 60 kV , 50 kV , 43 kV で実施し、結果をプロットしたのが図 5.12 であり、横軸がエネルギー付与の深さ、縦軸が単位照射量あたりの吸収線量を表す。ダイヤが 810 線量計の実測値 D_{ave11} 、白丸は各条件における $D_{ave47-11}$ である。加速電圧を低くすると、電子線射出窓や窒素による吸収が大きくなるため、線量計に付与されるエネルギーは小さくなり、単位出射量あたりの吸収線量は小さくなっている。加速電圧 43 kV - 70 kV までの全ての測定において、 D_{ave11} は、 $D_{ave47-11}$ と測定不確かさ 2σ の範囲内で一致していた。このグラフの傾向から、PENELOPE によって計算された深度線量分布は、 $11 \mu\text{m}$ 以下の領域でも $4.4 \mu\text{m}$ まで FWT-60 線量計内の深度線量分布を再現していることが示唆された。

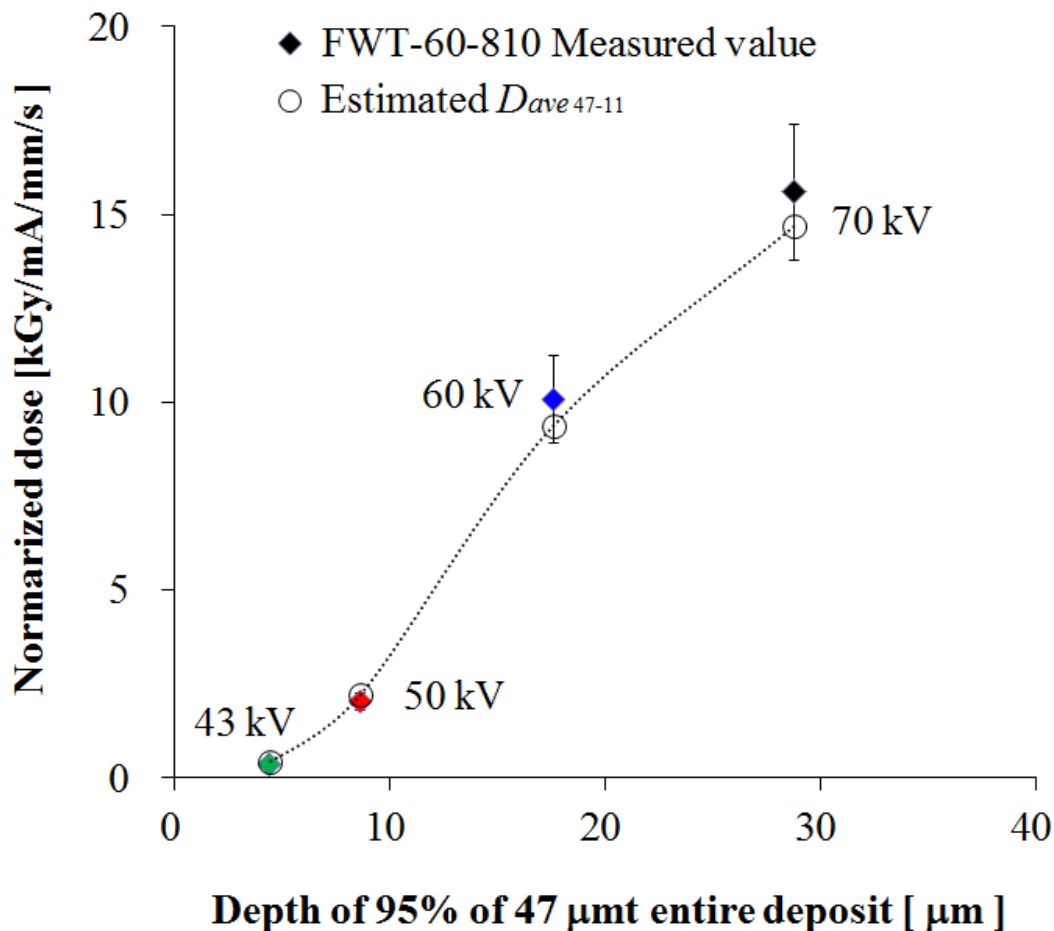


図 5.12 各加速電圧条件における FWT-810(11 μm) の実測値と、規格化深度線量分布と 47 μm 線量計の応答から計算された $D_{ave47-11}$

5.7 結果と考察

以上の実験結果から、第 5 章の実験で用いた手法を用いることにより、線量計の表面数 μm から線量計厚さの範囲における相対的な線量分布を知ることが出来、数 μm 単位での相対的な深度線量分布の評価を既存の線量計を用いて行うことが出来ることが判った。照射パラメータごとに図 5.11 および図 5.12 のような関係を求めることで、ULEB プロセスに求められる改質特性（改質深さ、必要な線量）に適合した加速電圧、処理時間を見積もることが出来る。また、照射される材料内の相対的な深度線量分布を把握することが出来るようになることで、処理したい材料の任意の厚さ範囲内における最大、または最小線量の確認や、線量に応じた処理後の改質度の深さ方向の勾配の評価にも用いることができる。この手法は、電子線処理したい材料の厚さ、処理に必要な最低線量が決められ、かつ基材の放射線劣化防止のために基材への吸収線量を一定量以下に抑制したいような典型的 ULEB プロセスの設計に応用することができる。

本研究は加速電圧 43 kV から 70 kV までの電子線照射に対する FWT-60 線量計の応答に対して、線量計内部の相対的な深度線量分布を得るために適用可能であるが、留意すべき制限もある。高エネルギー電子線の応答に基づいた応答関数を ULEB に適用しているため、絶対線量による管理が求められるようなアプリケーションには直接適用することは出来ない。また、電子が照射される材料最表面付近の物理現象（後方散乱など）をモンテカルロシミュレーションがどこまで正確に再現しているかについても検証の余地は残っている。エネルギー付与深さ 4.4 μm 以下の評価については、今回の図 5.12 の結果を見る限り、エネルギー付与深度が浅くなると、線量は緩やかにゼロに漸近していくと予測される。エネルギー付与深さ 4.4 μm 以下の領域において実験で検証するためには、現在市販されているラジオクロミックフィルム線量計よりもさらに薄い特注フィルムを製造して検証する必要があるだろう。今回は FWT-60 線量計に限定しているが、今後これ以外の市販の線量計（GEX B3 線量計など）についても評価が求められるだろう。以上の制限を考慮し、相対線量による評価が可能な応用範囲において、本手法は工業用 ULEB プロセスの設計、改質評価に適用できる。

5.8 第 5 章の結論

加速電圧 43 kV から 70 kV までの ULEB 線量測定において、高エネルギー電子線で校正された FWT-60 線量計の応答関数から得られる吸収線量に、PENELOPE で計算された深度線量分布を適用することで、線量計内部の厚さ領域における相対的な線量分布を求めることができる。今回の実験結果では、ラジオクロミックフィルム線量計へのエネルギー付与深度が、線量計厚さ 11 μm よりも薄い照射条件においても、PENELOPE で計算された相対深度線量分布に基づいて得られた予測値と実測値は測定不確かさ 2σ の範囲で一致することが示された。この手法を工業用プロセスに応用することで、ULEB 照射プロセスの特徴である表面数 μm の吸収線量評価や、硬化させたいコーティングの厚さ領域と放射線劣化させたくない基材フィルム領域の線量評価など、不均一な線量分布をもつ厚さ領域において、線量計厚さに制限されない評価が可能になる。この手法は、絶対線量による線量管理が必ずしも必要とされない工業用プロセスに ULEB を導入する場合のプロセス設計を従来より詳細に行うことを可能にし、応用範囲の拡大に貢献できるだろう。

第5章の参考文献・引用

- [1] S.Matsui, T.Hattori, T.Nonaka, Y.Watanabe, I.Morita, J.Kondo, M.Ishikawa and Y. Mori *Measurement of relative depth-dose distribution in radiochromic film dosimeters irradiated with 43–70 keV electron beam for industrial application*, RADIATION PHYSICS AND CHEMISTRY, **146C** (2018), pp. 91-95
- [2] Chmielewski, AG and Haji-Saeid, M, *Radiation technologies: past, present and future*, Radiation physics and chemistry, 71, vol.1, P17-21(2004)
- [3] Chmielewski, AG and Al-Sheikhly, M and Berejka, AJ and Cleland, MR and Antoniak, M, *Recent developments in the application of electron accelerators for polymer processing*, Radiation Physics and Chemistry, vol.94, P147-150(2014)
- [4] Helt-Hansen, Jakob and Miller, Arne and Sharpe, Peter, *Dose response of thin-film dosimeters irradiated with 80-120keV electrons*, Radiation Physics and Chemistry, vol.74, No.5, P341-353 (2005)
- [5] Helt-Hansen, Jakob and Miller, Arne and Sharpe, Peter and Laurell, Bengt and Weiss, Doug and Pageau, Gary, *D μ —A new concept in industrial low-energy electron dosimetry*, Radiation Physics and Chemistry, vol.79, No.1, P66-74 (2010)
- [6] Helt-Hansen, Jakob and Miller, Arne and McEwen, Malcolm and Sharpe, Peter and Duane, Simon, *Calibration of thin-film dosimeters irradiated with 80-120 keV electrons*, Radiation Physics and Chemistry, vol.71, No.1, P355-359 (2004)
- [7] Salvat, Francesc and Fernández-Varea, José M and Sempau, Josep, *PENELOPE-2006: A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport*, Workshop proceedings, vol.7 (2006)
- [8] Sempau, Josep and Andreo, Pedro and Aldana, Judith and Mazurier, Jocelyne and Salvat, Francesc, *Electron beam quality correction factors for plane-parallel ionization chambers: Monte Carlo calculations using the PENELOPE system*, Physics in medicine and biology, Vol.49, No.18, p4427 (2004)
- [9] Fernández-Varea, JM and Liljequist, D and Csillag, S and Rätty, R and Salvat, F, *Monte Carlo simulation of 0.1–100 keV electron and positron transport in solids using optical data and partial wave methods*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms,

- Vol.108, No.1, P35-50 (1996)
- [10] Matsui, S and Mori, Y and Nonaka, T and Hattori, T and Kasamatsu, Y and Haraguchi, D and Watanabe, Y and Uchiyama, K and Ishikawa, M, *Energy deposition evaluation for ultra-low energy electron beam irradiation systems using calibrated thin radiochromic film and Monte Carlo simulations*, Review of Scientific Instruments, Vol.87, No.5, 053309 (2016)
- [11] Sempau, J and Fernandez-Varea, JM and Acosta, E and Salvat, F, *Experimental benchmarks of the Monte Carlo code PENELOPE*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol.207, No.2, P107-123 (2003)
- [12] Abdel-Fattah, Atef A and Miller, Arne, *Temperature, humidity and time. Combined effects on radiochromic film dosimeters*, Radiation Physics and Chemistry, Vol.47, No.4, P611–621 (1996)
- [13] *Using radiachromic dosimeters: Product Application Literature PAL-1*, FAR WEST TECHNOLOGY (2009)

第 6 章

ULEB 照射源販売事業における製品開発プロセスとその不確実性に対する分析

6.1 第 6 章の概要

6.1.1 本研究における経営学的側面

ULEB 照射源販売事業は著者の所属企業 (以下 Q 社とする) が ULEB 照射源を販売することで顧客に価値を提供し、利益を得ることにより事業を継続させ、社会に貢献していくものである。このためには、ULEB 照射源を使用する顧客によって形成される市場から絶え間なく更新され続けるニーズを満たすための継続した製品開発が必須である。たとえば技術的に優れた性能・特長を有している製品であっても、それが市場と顧客のニーズに適合していなければ、製品は売れず、結果として事業は衰退していくだろう。

一方で、ULEB 照射源は特定の用途に限定して開発されたものではない。第 2 章で述べたように、ULEB 照射源の応用が期待される分野は印刷、コーティング硬化、表面改質、表面滅菌など多岐にわたる。このため、一つの分野で市場を開拓しても、その後は異なる分野の市場開拓が必須であり、その市場に適合させるための新たな製品開発が必要となるであろう。この継続した新市場開拓と、それに対応する新製品開発のプロセスが ULEB 照射源販売事業の基軸であるといえる。これを達成するためには、市場・顧客と事業者・製品開発者が対話を通して相互の目標とその達成のために取り組むべき技術的課題を明確化していき、効率的な市場開拓と製品開発作業を行っていくことが必要である。第 6 章は、技術的課題以外の経営的な側面に焦点を当て、ULEB 照射源販売事業推進のための知見を得ようとする試みである。

6.1.2 分析の背景と動機

第5章までは、ULEB 照射源販売事業に必要な技術的課題を解決してきた。これは、初期の市場開拓のための技術的課題の一部を解決したものに過ぎず、これが即ち ULEB 照射源販売事業の継続的な成功を保証するわけではない。事業を継続させるためには新しいユーザ、新しい市場に向かって常に製品市場を拡大していく必要があり、そこからはまた新たな技術課題が提示されるだろう。事業開発はこのような課題解決のサイクルそのものといえる。

ULEB 照射源販売事業は、Q 社の既存技術を応用することで、新製品である ULEB 照射源を開発し、Q 社が経験したことのない市場に向けて製品を販売するものである。そして、市場で ULEB 照射源を利用する顧客のほとんどは、顧客自身にとっても経験したことのない新技術を採用すると想定される。ULEB 照射源事業は、Q 社内の新規事業として開始されて以来、現在まで複数の分野における試作品の開発、販売を通じた市場開拓プロセスがあった。その過程において、Q 社が未経験かつ未知の分野に対して、自社の認識の範囲で市場と顧客のニーズを見定めて行動した結果、製品開発作業には大小の紛糾が発生した。ULEB 照射源販売事業はこのように製品開発者と顧客の相互において「未経験」、「未知」という要素が伴う展開を継続していくプロセスである。そして、この「未経験」、「未知」という要素が、今後の事業継続と拡大にとって大きな障壁になると考えられる。

新規事業における製品開発は、未経験かつ未知の分野を開拓するゆえ暗中模索のなかで行われるものである。事前の限定された情報に基づいて綿密なプランを立て、それを忠実に実行していけば、確実に市場を獲得できるとは必ずしも言えないだろう。また、今後も ULEB 照射源販売事業を継続して拡大させていこうとする時、最初の市場開拓時と同様に、別の新規市場に向けた新たな製品開発プロセスが待ち受けている。この新たな新規市場開拓の状況においても、製品開発は同じように「暗中模索」の状況を変えることはできないのだろうか。

既に経験した、未知の分野への市場開拓と製品開発プロセスから学び、次のプロセスを効率化できる形式知、実践知を残せないか、と考えたのが本分析の動機である。これまでの ULEB 照射源販売事業で経験した製品開発プロセスを俯瞰し、当時の行動とその背後にあった状況を現在の視点に基づき解釈し、今後の製品開発に向けて留意すべき教訓を具現化することは、今後同様の市場開拓を行う際に有用であろう。それにより、新製品開発やマーケティング活動は効率化かつ正確化し、結果として新規市場開拓の成功確度を向上させることができるだろう。

6.1.3 第6章の構成

第6章では、ULEB 照射源販売事業の継続的な拡大を効率的に行っていくための製品開発マネジメントに関する分析を行う。まず、新製品開発と新規事業について、その定義を確認し、ULEB 照射源販売事業において経験した製品開発プロセスとの照合を行う。Q

社が経験した新規事業における製品開発プロセスの特徴を明確にし、従来のプロセスで新規市場開拓を継続することの問題点を提起する。次に、製品開発プロセスにおける先行研究のレビューを行い、Q社がULEB照射源の販売事業において経験してきた一つの市場開拓プロセスを、先行研究の枠組みに基づいて記述する。この記述に基づき、ULEB照射源販売事業がかつて経験した紛糾の原因を分析する。最後に、上記分析に基づいて、今後の製品開発プロセスを効率化できる可能性のある提案を行い、結論を述べる。

6.2 新規事業の定義とQ社のULEB照射源販売事業

ULEB照射源販売事業を分析するために、まず「新規事業」という言葉のもつ意味、社会通念としての定義を確認する。そして、Q社の事業内容と比較することで「新規事業」としてのULEB照射源販売事業を客観的に捉えることを試みる。一般的に使われる「新規事業」という言葉の定義およびその意味する範囲と、Q社の新製品開発事業における文化的背景を確認し、両者の一致性を確認する。これにより、ULEB照射源販売事業を経営学的に分析するためのフレームワークを参照することができる。そのうえで、Q社がULEB照射源販売事業を効率的に拡大させていくための課題を、組織内における学習観にフォーカスしながら提起する。

6.2.1 新規事業の定義

まず、言葉の定義として、新規事業は、その名の示すとおり、「新規」に「事業」を興すことである。事業を興す企業からの視点で見ると、それは『社内ベンチャー』、『分社』、『新事業』などとも呼ばれ、一般に、自社の既存事業とは異なる内容や形態の事業を推進していくこと [1](p.13) とされている。一方で、それが社会全体からの視点で見た時、それ以外にも様々な新規事業の捉え方がある。

H.I.Ansoff [2, 3] は「成長ベクトル (growth vector : 図 6.1)」において新規事業を「市場」と「製品」の二つの軸によって設定し、それぞれ「既存」または「新規」と分けるマトリックスで説明することにより、事業における企業の成長の方向性を示した。図 6.1 の企業成長の枠組みにおける各領域の中で、「市場開発」、「製品開発」および「多角化」の3領域が新規事業領域に該当する [6]。この3領域はいずれも、市場および製品 (製品を生み出す技術) のうちの少なくとも一方が、当該企業の既存事業領域に該当しない事業を扱っている。それゆえ、新規事業には、市場と製品のうちの少なくとも一方においてある程度のリスクが存在し、それが新規事業を困難なものにしているといえる。

「市場開発」型の新規事業では、既存市場とは異なる新規市場に関する知識や情報に乏しい。また「製品開発」型の新規事業では、既存製品に代わる新製品の開発に関する知識や情報に乏しい。このため、両事業とも、既存事業よりも多少の失敗のリスクや損失の可能性があり、不確実性が高い。「多角化」型の新規事業では、既存市場や既存製品を利用できない分だけ非常にリスクが大きく、多額の損失や事業撤退などの失敗の可能性が非常



図 6.1 H.I.Ansoff の成長ベクトル [3]

に高くなってくる [7]。

大江は新規事業を「市場、技術、製品、サービスについて、企業にとって新しい部分や未知の部分が多くあり、それらを企業が学習しなければならない事業」[1](p.12)、「既存事業の水準を超えて、企業が新たに学習しなければならない未知の事柄が含まれる事業」[1](p.13)と定義している。すなわち、新規事業とはそれを遂行する企業や、それを受け入れる市場において、「未知(新規)」の要素がどの程度関わっているかが重要であると言える。

6.2.2 Q社における新製品事業とその文化的特徴

Q社のULEB照射源販売事業に対し、一般的な新規事業の枠組みが適用できるかどうかを検討するために、まずULEB照射源販売事業の特性を、Q社がもつ文化的背景に基づいて分析する。

Q社は、「経営戦略の実現に向けて計画を策定し、その実行を図る一連のプロセスにおいて、現場の自律性が極めて高い」という特徴を有しており、「従業員の一人ひとりが経営者として育つことを見守る経営を行っている」という文化的特徴がある[4](p.248)。Q社はまた、各製品の販売を担当する部門に対して、小集団部門別採算を導入している[4](p.248)。Q社の事業部内において「新規試作テーマ」として発案され、試作品開発プロセスを経て、定常的に一定の売上げを期待できるようになった製品は、これらを担当する部門に製造・開発活動が引き継がれる。新規試作テーマの担当者はまさに製品化、製造・部門化を目標にしているという側面があり、河野は「同社は、一企業だが複数のベンチャーが集まったというのが本質である」[5](p.192)とも述べている。

ULEB照射源販売事業は、Q社の既存技術を応用することで、Q社が経験のない新規市場に向けて、経験のない新技術をもつ製品を販売するものである。Q社は光検出器の製造・販売を基幹事業とする企業であるが、必ずしも「検出器」のみの事業だけではなく、光

源やレーザ、またはそれらを統合したシステム製品の販売事業を展開している。こうした背景もあり、ULEB 照射源販売事業は、光検出器事業で得た要素技術と、工業用エックス線源の事業で得た要素技術を組み合わせることでその基本アイデアが提出されたことに始まった。そして ULEB 照射源販売事業がターゲットとする市場は、その要素技術の基盤となった各製品の市場とは異なる分野であり、Q 社にとっては未知の市場への進出であった。以上から、ULEB 照射源販売事業は、Q 社事業全体にある「光」という枠組みの中で、新製品を未経験の分野に販売していくという新規事業であるといえる。

6.3 ULEB 照射源販売事業を効率化するための課題と分析の目的

新規事業である Q 社の ULEB 照射源販売事業を効率的に継続していくために必要な要素、およびそのための課題を提起する。新規事業には新しい部分や未知の部分が多く、それに伴うリスクを回避するために、学習しなければならないことは既存事業と比べて格段に多い。「新規」であるがゆえに、「市場や技術、製品、サービスに関して何か新しいことや未知の部分があり、企業がそれを学習しなければならない事業」[1](P.12) という定義そのものに新規事業の難しさが内在している。新規事業においては、既存事業のやり方＝計画経済的なやり方を新規事業に当てはめてしまい、失敗するケースがよく見られるという [1]。企業内に蓄積された過去の経験や知識があまり役に立たないので、試行錯誤を繰り返して知識を蓄積していくしかない。前節で述べたとおり、Q 社が今後も ULEB 照射源販売事業を継続するには、未経験分野への市場拡大が必須である。このためには、製品開発者と顧客の相互において「未経験」、「未知」という要素が伴う製品開発プロセスを学習しながら効率化していくことが求められる。学習の積み重ねにより、未経験かつ未知の分野の開拓を暗中模索のなかで継続するのではなく、既に経験した市場開拓と製品開発プロセスから次のプロセスを効率化できる形式知、実践知を抽出できるかが課題であるといえる。

6.3.1 新規事業・新製品開発における成功者の学習観と教育観

新規事業における試行錯誤と学習のプロセスをより確実に、効率的に行うための指針を探ろうとすると、その障害となりうる事例が指摘されている。それは、過去に社内で新規事業（新製品の立ち上げ）をした社員がその経緯を語る場合であったり、それを又聞きした社員が話す場合である。このような新規事業、新製品開発経験者の語るライフストーリー、すなわち新規事業にまつわる武勇伝や苦労話が美談となり、暗黙的に組織運営の精神的な指針となっていることも少なくないことが指摘されている [8]。中原らは、「これらの話は、一定の成功を収めた後に当事者がこれらの経験談が実は不確かな記憶に基づいて語るものであり、理論的な検証はされていない場合がほとんどであり、深刻なデメリットがある。それらの多くは個人的な体験の中に押し込められ、組織としての体系的な取組へ

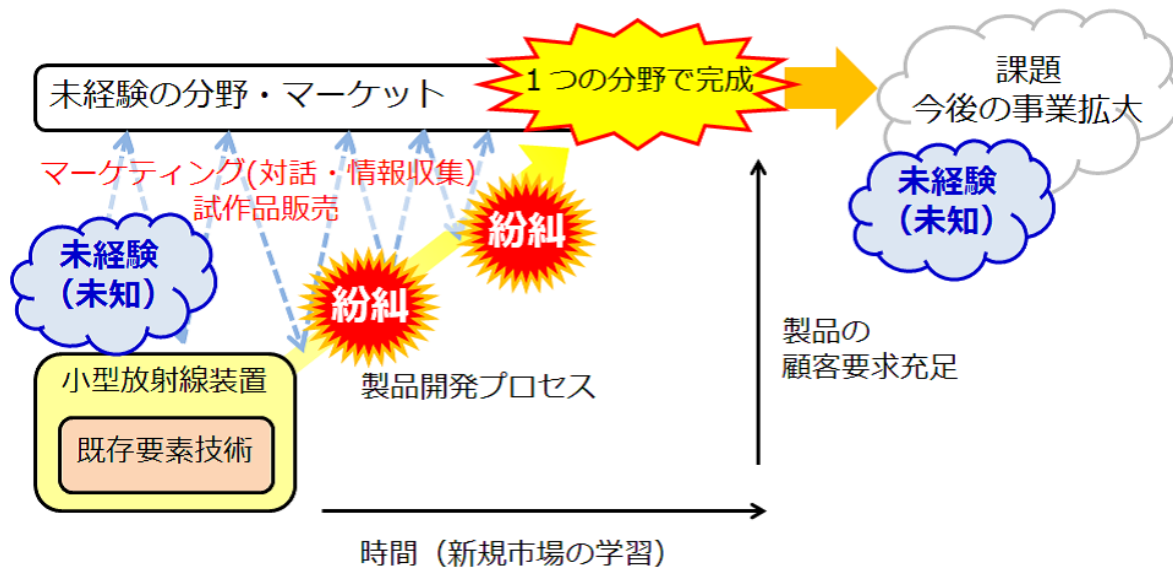


図 6.2 ULEB 照射源販売事業で経験したプロセス

と話が展開していくことがない」[8](p.2)と述べている。このようにして個人や組織に対する「学習観」や「教育観」が派生した結果、それらが組織に根付いていくこともある。新製品開発においても、その未知ゆえの困難と障害に立ち向かい、その結果として起こる苦痛とそれを乗り越えた過程が美化されて語り継がれることも多いだろう。

しかし、Senge が、「私たちの当初の努力が、長く続く改善を生み出すことができなかつたとき、私たちは一ボクサーと同じように一生懸命努力すればあらゆる障害は乗り越えられるという信条に忠実に一より強く押し続け、その間ずっと、いかに自分自身がその障害の原因になっているかに気付かずにいる」[9](p.111)と述べているように、自身が身を置くプロセスが構成されるシステムとその要素を理解し、障害の原因を確定できるのであれば、それを取り除いていくことが重要であろう。新規事業開発に潜むリスクとその解決方法を提案するためには、客観的な視点に基づいて分析し、より本質的かつ体系的に議論を進めることが必要である。

6.3.2 新規事業において紛糾を生み出す不確実性

新規事業が既存事業と比べて未知の部分が多いということは、将来の出来事を予測できない「不確実性」が備わっていることを示している。この「不確実性」は様々なリスクを生み出している [10]。そして、不確実性は、何か有効な手が打てるか否か、もしできるなら、何を、どのように、という問題を提起する [11](p.79)。ULEB 照射源販売事業で経験したように、新規事業には紛糾を生み出す原因となる不確実性があるのならば、その不確実性の原因を特定し、以後その不確実性による同様のリスクを削減できる方法が提案できるはずである。

新規事業を遂行するには、未経験ゆえに知識化されていない部分を仮定や推測で補うこ

とは避けられない。計画の一部が仮定や推測に基づいていて、知識に基づいていないことが、ULEB 照射源販売事業における製品開発プロセスで経験した紛糾の要因になったのではないかと考えられた。開発者とユーザの双方において未知の要素が多いため、計画(想定)と実績(結果)が乖離してしまう。そして、乖離が一定以上のレベルを越えた時、紛糾が発生する。こうした紛糾を防ごうとするならば、未知ゆえの仮定や推測と、確かな経験に基づく知識の違いを生み出す不確実性を明らかにし、不確実性の原因を特定することが必要である。その不確実性を低減させるプロセスを提案することは、今後も継続して、かつ効率よく新規事業を行うために重要である。

6.3.3 本分析の目的—新規事業における不確実性とその低減

今後 ULEB 照射源販売事業で製品開発を継続していくには、最初に経験した事例に基づいて望まない紛糾のもとになった原因を分析し、次の新規市場開拓における指針となるプロセスが確立されることが必要である。一度経験した紛糾の構造を分析して「学習出来る要素」を抽出し、それを形式化し今後の不確実性を低減できる仮説として提案する。「新規事業を推進することは、まさに『仮説を知識化していくプロセス』なのである」[1](p.200)といわれている。この仮説の知識化と検証を積み重ねることで、その後繰り返されるであろう未経験市場に向けたの ULEB 照射源販売のための製品開発において、類似する不確実性は削減され、開発プロセスは効率化されていくだろう。

本分析は、未経験の分野に新技術を携えた新製品を販売する事業において、製品開発プロセスの不確実性がどこに、どのような原因で存在するのかを見つけ、未経験市場開拓における製品開発に潜む不確実性を可能な限り低減するプロセスを提案することを目的とする

6.4 製品開発プロセスにおける先行研究

6.4.1 成功要因研究

主に 1970 年代に行われた新製品開発の成功要因研究は、後の新製品開発プロセス研究に多大な影響を与えており、新製品開発プロセスに内包されている意味を理解する上でも重要である。これらは成功および失敗した新製品開発の事例から、包括的に成功要因を明らかにすることでその現象を理解しようとする試みであった。代表的な研究としては、イギリスにおける Rothwell *et al.* の”Project SAPPHO”[12]、カナダにおける Cooper の”Project New Prod”[13, 14] の研究、アメリカにおける Maidique and Zirger の”StanfordInnovation Project”[15] の研究等がある。

Project SAPPHO は新製品の成功事例と失敗事例の違いから新製品開発の成功要因を明らかにしようとした研究であり、顧客ニーズの理解やマーケティング活動への関心、開発効率や、強力な責任者など 5 つの要因が新製品の成功に重要であることを発見してい

る。そして最終的な結論として、最も重要な成功要因は「顧客ニーズを満たすこと」であると主張し、そのためには、顧客ニーズは正確かつ深く理解し、常に目を向けていることが重要であると指摘している。また、マーケティング活動と設計開発活動が互いに連携することの重要性も強調している。

カナダで行われた Project NewProd は、市場と企業のリソース、そして外部環境の影響を受けて生まれる新製品開発プロセスから商業全体 (commercial entity) が発生し、新製品開発の成功はその商業全体と市場の環境によって左右されるとする概念モデルを主張した。そのモデルに基づいて分析が行われた結果、新製品開発の成功要因として、販売、プロモーション、顧客ニーズの把握などのマーケティング能力や、製造、開発だけでなく、流通におよぶ 15 の要因を挙げている。

Stanford Innovation Project は新製品の成功要因として、マーケティングやコストパフォーマンス、開発プロセスやマネジメントに関連する重要項目を明らかにした。さらに研究結果を Project SAPPHO および Project NewProd の結果と比較し、これらの共通点としてイノベーションの成功は複合的な要因から生まれること、新製品開発の基本は市場の理解であることを指摘している。

これらを代表とする新製品開発における成功要因に関する研究は、1990 年代以降、新しい研究アプローチ手法を取り入れながら進展しており、後の研究の精緻化や一般化のために重要な概念枠組みを提供し、後の新製品開発プロセスに関する研究に大きく寄与している [16]。

6.4.2 新製品開発プロセスのリニア・モデル

1980 年代には新製品開発のプロセスに焦点があてられるようになった。製品開発が各種段階を経て、最終的に実行可能な形が現れるという一連のプロセスが、時間的に順次起こるプロセスを、「リニア・モデル (linear model)」と呼び、これらはさらに、技術シーズを開発の起点とするテクノロジー・プッシュや、顧客ニーズを起点とするデマンド・プルの考え方に大別される [18, 17]。

リニア・モデルの代表例としては、「フェーズ・レビュー・プロセス」[20] や、「ステージ・ゲート・システム」[21] がある。「フェーズ・レビュー・プロセス」[20] は、開発プロセスを複数のフェーズ (段階) に分割し、各フェーズを担当者が責任を持って完了させて次のフェーズの担当者に受け渡し、インプットとアウトプットを明確にしたうえでそのフェーズ終了時にプロジェクトを進めるか否かを決定するためのマネジメントレビューを行うものである。「ステージ・ゲート・システム」[21] は、発見・アイデア創出、初期調査、ビジネスプランの策定、開発、テストと検証、市場投入という開発過程の各ステージにゲートが設置され、各ステージ終了時にプロジェクトを進めるか否かの意思決定をするポイントに進めるためにチームが集まり次のステージの活動の承認が行われる。

リニア・モデルは、プロセスのつながりを重視するモデルともいえ [16]、次の行動の指針を示すマネジメントツールとして実務現場で広く活用されているモデルもある。製

品開発モデルの範疇ではないが、KPI(Key Performance Indicator) や KGI(Key Goal Indicator) などの評価指標に支援された製品開発プロジェクトもその一例と考えることができる。一方で、川上 [18] は、細分化されたプロジェクトにおける各段階が一方向に順次進むとするリニア・モデル全般について、開発スピードや効率の面での課題を指摘している [18]。さらに、リニア・モデルの決定論的視座に基づく考え方は、目標や計画が未確定の場合を説明することは困難である。本分析で注目している未経験分野における新規事業製品開発プロセスのように、複雑で未確定要素の多いプロセスをリニア・モデルのみで十全に説明することは困難といえるだろう。

6.4.3 新製品開発プロセスのノン・リニア・モデル

リニア・モデルは複雑な新製品開発プロセスをシンプルに概念化したモデルであるが、プロセスの中身を重視したモデルがノンリニア・モデルである [19]。技術や需要から開発プロセスがスタートするリニア・モデルとは対称的に、ノン・リニア・モデルは非決定論的視座に基づいている。Kline & Rosenberg[17] は、イノベーションには開発プロセスにおける試行実験やそのフィードバックの中で得られる学習のプロセスを経ることが必要不可欠であるとし、複数のフィードバック・ループを有する「連鎖モデル (chain-linked model)」を提唱した。この連鎖モデルのように、ノンリニア・モデルは、複雑で偶発的な要素を含むモデルである [16]。ノン・リニア・モデルと呼ばれる研究には、連鎖モデルの他に田中 [22] の「イノベーションのゴミ箱モデル」や山下 [23] の「動的秩序形成プロセス」、石井 [24] の「意味構成・了解型モデル」、「経験学習モデル」 [29] 等がある。

Kolb[29] は、学習を過去の経験からマイセオリー (次の経験の際に判断基準となるもの) を生み出すことと捉え、「経験学習モデル」を提唱し、Carlsson *et al.*[30] はこの「経験学習モデル」を研究開発組織に援用した。経験学習モデルでは、経験、省察、概念化、実践という4段階が繰り返されるとされ、このプロセスは1度で終了するのではなく、各段階が何度も繰り返されるとされる (図 6.3)。このモデルから示唆されるマネジメント手法として、Kolb[29] は、例え時間がかかっても重要な出来事に対しては十分に議論すること、そして反対意見を含む複数の視点を持つことの重要性を指摘している。

経営組織において新製品開発を行う際には、事業計画としての目標が設定されたり、開発組織のマネジメントのための計画が効果的であることもあり、新製品開発プロセスのすべてがノン・リニアな行為とは断言できない。新製品開発のマネジメント現場では、リニア・モデルのようにプロセスの全体を見渡せるマクロな視点と、個々のプロセスの中身を動かすミクロな視点の両方が求められるだろう。リニア・モデルのもつマクロ視点・決定論的視座と、ノン・リニア・モデルのもつミクロ視点・非決定論的視座の接点を見出し、両者の理論的融和を探る議論もはじまっている。

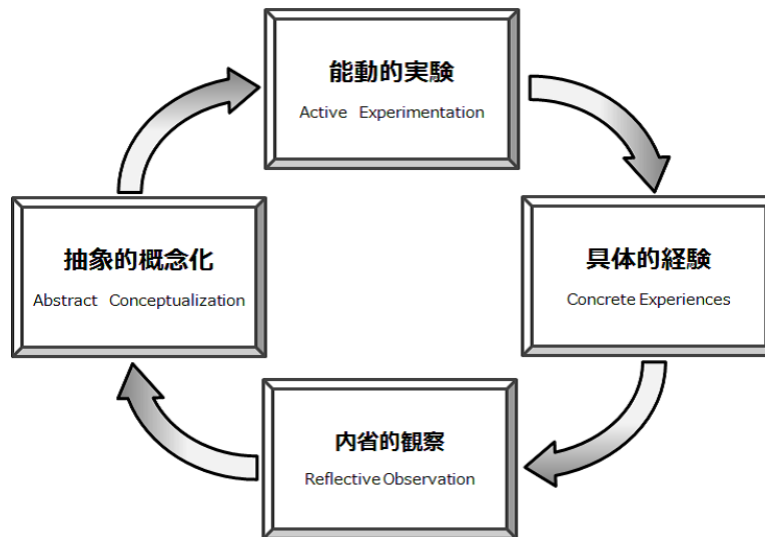


図 6.3 経験学習モデル [29]

6.4.4 リニア・モデルとノン・リニア・モデルの理論的融合を目指したモデル

リニア・モデルとノン・リニア・モデルの理論的融和が見られる理論としてはまず、加護野 [25] の「組織認識論」が挙げられる。組織における人々の認識過程に着目し、それまで議論されることのなかった人々の「見る」、「知る」、「わかる」等の認識過程に対する新たな視点を開拓した。その他にも、リニア・モデルに見られる決定論的視座と、ノン・リニア・モデルに見られる非決定論的視座の両者の接合点とバランスを見出し、新製品開発プロセスをより正確に説明しようとするモデルとしては、沼上 [26] の「行為の連鎖システム論」、加藤 [27] の「技術システムの構造化理論」、川上 [18] の「状況論的アプローチ」等がある。これらは、新製品開発のように複数の分野の人々が協働する活動では、知識の共有や分有が求められるためには、組織における人々の認識過程を理解することが必要であることを指摘し、組織現象全体を理解するための新しいものの見方を提供している。

6.4.4.1 組織認識論

加護野 [25] は「組織認識論」において、従来の組織論における組織的な認識活動または認識過程についてのモデルとして情報処理モデルには限界があることを指摘している。情報処理モデルでは、組織的な協働を情報処理という観点から人間や組織をコンピュータのような合理的な存在として捉えようとし、「見る」、「知る」、「わかる」等の認識過程は十分に議論されておらず、人々を取り巻く社会的文脈や、組織におけるものの見方や考え方の変化といったダイナミックな変化に十分に対応できていないという。行為者は情報そのものではなく、情報をもたらす意味に反応するとされ、ある人が伝えようとした意味は、その通りに誤解なく他者に伝えられるとは限らない。ある人の行為は、他者に伝達される

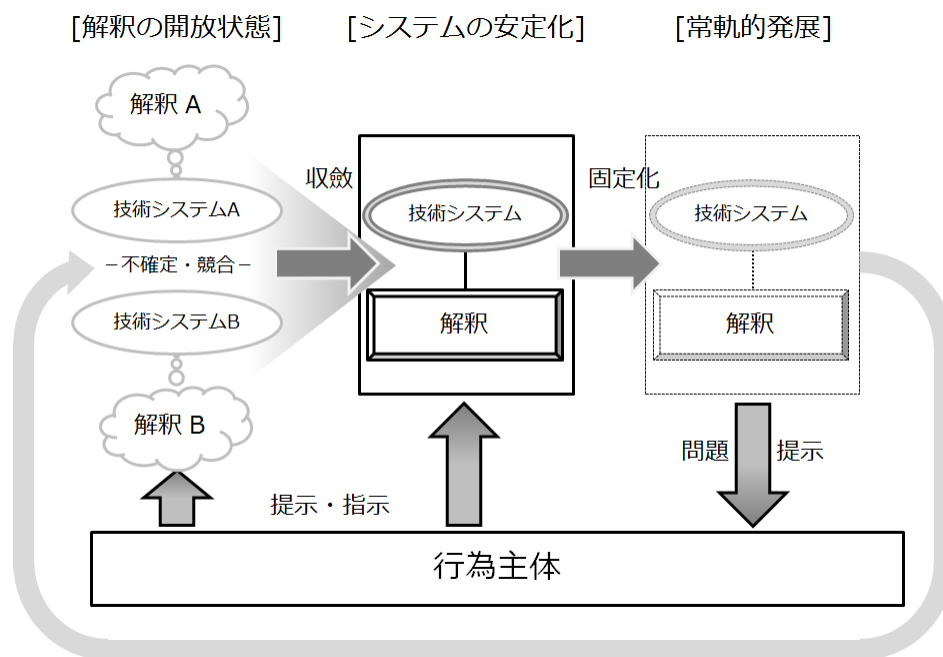


図 6.4 技術システムの構造化理論 の基本的な構図 [27]

過程で、伝えようと意図した意味以上に多様な情報を発生させるからである。組織認識論 [25] は、新製品開発プロセスにおける組織の創造性等、情報処理モデルでは理論的な分析が難しいとされる問題に対し、1つの分析可能性を示唆する理論であろう。

6.4.4.2 技術システムの構造化理論

加藤 [27] は、ノン・リニア・モデルの特徴である非決定論的な視座を基本としながらも、決定論的構図が部分的に生じる状況を理論的に説明し「技術システムの構造化理論」と呼んだ (図 6.4)。技術発展の初期段階において、その技術に対する「解釈」は外的な要因によって規定されているのではなく、行為主体によって様々な解釈がなされるため、それに付随して技術システムが複数構成される (解釈の開放状態)。複数の解釈と技術システムは、時間の経過とともに複数の行為主体間で共有され、収斂していく (解釈の安定化)。技術の解釈とそれに基づく技術システムが安定化すると、そこから新たな問題が提示され、技術発展が特定の方向に向けて行われる (常軌的發展)。この常軌的發展の段階では、決定論的な説明が成立しうる。

しかし、一見決定論的な説明が成立するような状況であっても、当該技術に対する解釈とそのシステムは、前述のように、絶対的な要因によって規定されているわけではない。支配的であった解釈と技術システムが再び問い直される状況になる可能性は常に存在しており、この「技術の再解釈」が生じて、多くの行為主体によって受け入れられると、当該技術に対する解釈とそのシステムは再度不安定な状態になると同時に、逆に技術発展の方向性に関する新たな可能性が再度「開放」される。このように、いったんは確立した解釈と技術システムの社会的な再検討の過程は、Abernathy[28] らが「脱成熟 (de-maturity)」

と呼んだ状況に対応している。

6.4.4.3 状況論的アプローチ

「状況論的アプローチ」では、人間の行為をその行為の対象との相互行為が展開する中で即興的かつ局所的に作り出されているものと捉え、新製品開発における目的や計画は、行為の中でその都度局所的に見えてくるものであり、開発プロセス全体を支配しているというよりむしろ大まかな方向づけを行う役割を担っているにすぎないとする [32]。川上 [18] は、状況論的アプローチに依拠してマーケティングと R&D の部門間関係と顧客情報の利用について分析・分析し、新製品開発において顧客情報がどのように利用されるか、という点に答える分析枠組みとモデルを提唱している。

6.4.4.4 リニア・モデルとノン・リニア・モデルの理論的融合を目指したモデルの小括

これまで述べた、製品開発プロセスのノン・リニアモデルの範疇にあるとされるモデルは、人の認知過程に着目したミクロな視点を有しながら、新製品開発を取り巻く複雑な環境や状況をマクロ的に捉えている点に共通点があるといえる。湯沢 [16] は、リニア・モデルとノン・リニア・モデルは「次元と役割が異なるコンテンツとコンテキスト」であり常に「併存」するものと捉え、媒体としての「情報」と行為者としての「人」が両モデルの融合を高め、「情報」と「人」の相互作用が新製品開発の成功確度に影響することを主張している。以上の製品開発プロセスにおける先行研究の枠組みを踏まえながら、次節から ULEB 照射源販売事業におけるプロセスの記述と分析を行う。

6.5 ULEB 照射源販売事業において経験した試作品開発プロセス

6.5.1 分析の方法

本節では、ULEB 照射源の事業化における試作品開発プロセスを記述し、分析する。著者は、本製品開発プロセスの途中（後述する試作品 2 以降）から試作品開発、評価作業および顧客対応に従事した。著者が従事していない期間は、開発当初から従事した関係者へのヒアリングや当時の開発・顧客打合せ議事録に基づいて記述し、筆者が従事していた期間についても同様に関係者へのヒアリング、議事録などの資料と自己の回顧に基づいて記述した。この記述に対して、前節で概観した新製品開発プロセスに関する既存のモデル、フレームワークによる分析を加える。

ULEB 照射源販売事業を記述、分析する作業は「経験学習モデル」[29]により以下のように説明できる。最初の新規市場開拓における製品開発で様々な紛糾が発生した（図 6.3: 具体的経験）。紛糾を含めた全ての製品開発プロセスを振り返って記述し（図 6.3: 内省的省

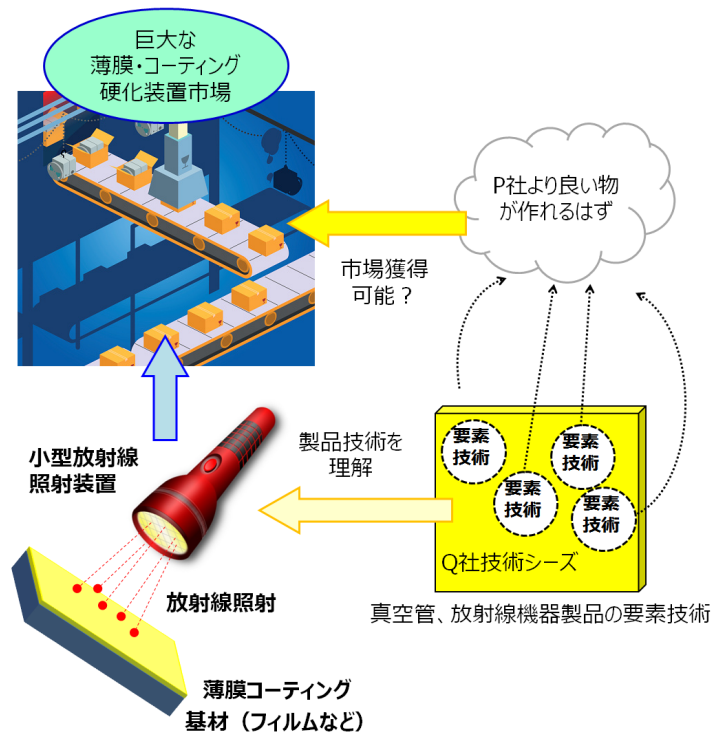


図 6.5 ULEB 照射源開発の経緯

察)、紛糾の原因となった不確実性を抽出し明確化する (図 6.3:抽象的概念化)。そしてその不確実性に対処するための仮説を導き、次のプロセスでは具体的なその検証活動に続いていく (図 6.3:能動的実験)。記述されたプロセスは、組織認識論、技術システムの構造化理論を援用することで分析を試みた。このように分析していくことで、一度経験した試作品開発、販売プロセスで経験した多くの意図せざる、望まない紛糾をもたらした原因となる不確実性はどこに、どのように存在していたのかを客観的に明らかにする。そして、抽出された不確実性を今後の事業において削減していくために、どのように製品開発プロセスを改善すべきかを明確にすることを分析の目的とする。

6.5.2 事例概要

6.5.2.1 期間 I(開発のスタート、試作品 1)

本製品はある海外メーカ P 社により工業用 ULEB 照射源が発表されたことに始まる。これを受けて Q 社が放射線加工分野の調査を実施していくと、大型の放射線加工装置は市場、技術とも確立されていたが、生産ラインに搭載可能な小型の放射線加工装置は技術的課題もありほとんど市場投入されていない状態であることが判明した。そして、それら ULEB 照射源が用いられる薄膜材料 (表面コーティングなど) 硬化装置の市場規模が大きいとともに、この分野における既存技術である熱加工、紫外線加工などと比較して電子線加工が対環境性能面において有利であるという情報も得た。

こうして、放射線関連機器や真空管を用いた電子部品の製造技術を有する Q 社は、自

社がもつ要素技術を融合させることで同様の ULEB 照射源の開発が可能か検討を始めた。Q 社はこの ULEB 照射源に必要な要素技術をほぼ全て保有していた。放射線発生部とその制御、真空管の耐圧設計技術、真空管製造技術、荷電粒子軌道設計技術など、これら技術はすべて撮像管やエックス線管、光検出器など Q 社の既存製品に利用されている技術であった。これらの要素技術を融合し、改良・開発を加えることで、Q 社は ULEB 照射源の原理実証とするべく試作品 1 を完成させることが出来た。図 6.5 に当時の経緯と開発過程を示す。

ここまでで把握した市場の情報は以下の 3 点である。

- 電子線加工装置のターゲット (被処理材料) が薄膜化するのにあわせて電子線は低エネルギー化し、照射装置は小型化している。
- 電子線が低エネルギー化できれば照射装置が小型化され、インラインに搭載できる
- これまで UV や熱処理をしていたプロセスを置き換えることが出来れば、従来出来なかった処理や、より環境に良い処理が可能になる

その市場要求に応えるべく、Q 社は自社既存技術を利用して、ULEB 照射源を開発することになった。しかし、この時点では市場要求に基づいた具体的な製品スペックはまだ合理的理由に基づいて明確には決定されていなかった。

6.5.2.2 期間 II(試作品 1 による市場との対話の始まり)

試作品 1 の完成により、Q 社は自社技術で ULEB 照射源を製造・開発可能と判断し、市場へのアプローチを開始した (図 6.6)。そこで、薄膜材料製造業の顧客に、試作品とその技術アピールを行い、顧客から ULEB 照射源に対する具体的なニーズを探り始めた。この試作品 1 完成後の過程で初めて、Q 社は具体的な市場との対話が出来るようになった。そして技術的原理実証から次のステップとなる、生産現場で加工装置として求められる仕様、すなわち、試作品 2 の開発目標が明らかになっていった。それは、期間 I では市場に対する限られた情報と Q 社の主観に基づいて設定された曖昧な目標仕様が、顧客との対話を通して確かな市場要求として徐々に明らかになっていく過程であった。しかし一方で、それは顧客が求める薄膜材料加工に限定された市場要求でもあった。

6.5.2.3 期間 III(試作品 2 の開発)

試作品 1 の完成後に逐次顧客が ULEB 照射源に求める性能 (処理速度、処理幅など) が明らかになっていく中、Q 社は、試作品 1 を媒介とする顧客との対話によって得た情報に基づきつつ、かつ他分野の市場要求にも応えるため、新たな構造による試作品 2 の開発に着手した。こうして顧客を通して判明した市場要求である加工サイズ (電子線を出力可能な幅)、出力の増加に応えるためには、試作品 1 とは異なる構造が必要と判断され、新たな試作品の設計が必要になった。この加工サイズ増加と大出力化のために必要な技術が再度

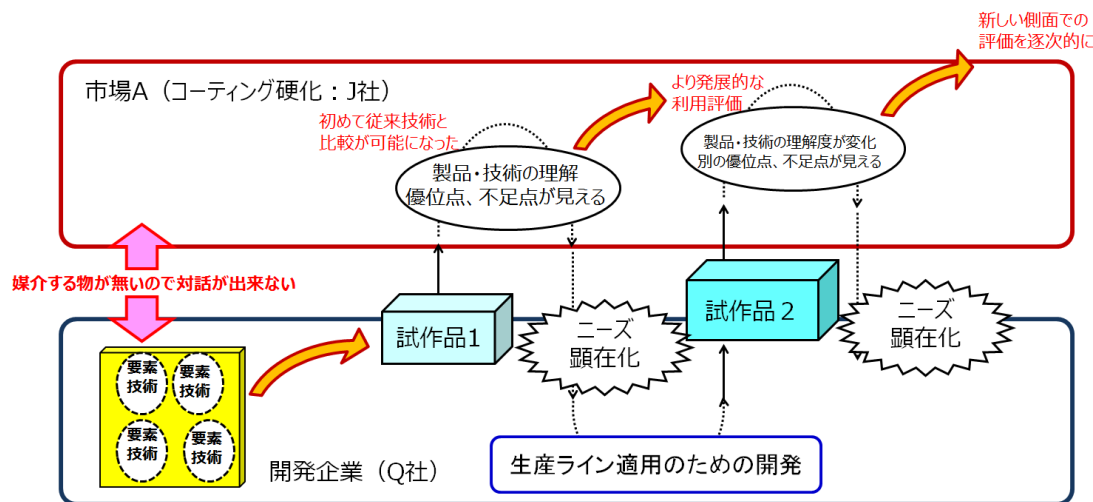


図 6.6 ULEB 照射源の試作品開発プロセス

社内技術から検証され、Q社既存製品(工業用エクス線管)の技術を採用することで解決された。ここにおいても、社内技術を採用したことで、大出力化に向けた製品評価の効率は向上し、比較的短期間で試作品2が完成した。また、この時点では未だ顧客との開発は完全に完了しているわけではなかった。電子線による薄膜硬化を達成するためには、照射される材料も電子線処理に合わせて開発する必要があったためである。このことから、製品を受け入れる顧客側にも新技術導入によって彼らの既存技術になんらかの修正が必要とされ、新技術に対する認識も常に変化していったことがわかる。

6.5.2.4 期間 IV(様々な応用分野へのアプローチ)

Q社は顧客との対話で得た ULEB 照射源に求められる市場ニーズ、特に生産設備のインライン搭載を見据えた性能要求を反映させた試作品2を完成させた。この試作品2は、「インライン対応 ULEB 照射源」として販売促進活動を開始した。すると、電子部品製造、機能性フィルム製造分野など、Q社がそれまで ULEB 照射源の市場として把握していなかった、顧客とは異なる薄膜処理プロセスを製造工程にもつ様々な分野の顧客からアプローチがあった。これは、顧客とのコミュニケーションを経て、分野こそ違えど「インライン対応」としての知識を身につけ、ULEB 加工装置をインライン対応としてアピールできるようになったことが大きく影響していると考えられる。こうした経験を経て、Q社は多方面の市場要求の情報を収集するべく、無償のデモ実験を実施し、実際に顧客サンプルの処理を行い、その効果を評価してもらうことで、インライン対応 ULEB 照射源としての市場性を探っていった。顧客との一分野での開発作業が進む中、並行してこの ULEB 照射源が顧客の関連分野以外の薄膜処理分野にも幅広く適用できる可能性があることが判り始めた。

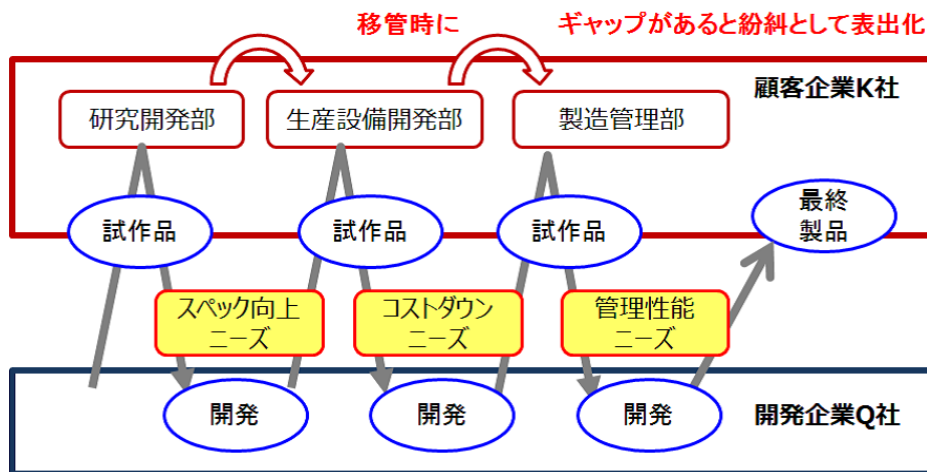


図 6.7 ULEB 照射源販売事業で経験した試作品開発プロセス:パターン a

6.5.2.5 期間 V(生産現場への適用プロセス)

その後、顧客を含め、デモ実験が良好であった幾つかの応用分野で並行して開発が行われていった。その中で、試作品 2 による検証実験によって顧客が期待する効果が十分得られていると判断された分野では、実際の生産現場でのインライン導入に向けての開発にシフトしていった。ここで次の 2 つのパターンに分類できる。

・パターン a

顧客企業 K 社の研究開発部署は、試作品 2 によって原理実証を行った結果、期待する効果が確認できたため、生産ラインに適用するべく検討を始めた。ここで、第 2 試作品で加工自体は十分可能だという原理実証はできたが、実際に生産ラインに適応させるには不足部分があることが明らかになった。例えば、処理に時間をかければ加工は十分完了するが、実際のラインでは時間をかけられないこと、また、電子線の照射幅が短いため、1 台では処理がカバーできないという問題である。この問題解決のためには、ULEB 照射源のさらなる出力アップと、それに付随する技術的課題の解決が必要であった。Q 社はこれら顧客要求を、対話を通して明確にし、自社技術と照合しながら開発を段階的に進めていくことでこの課題を克服していった。その一方で、開発が進むにつれて、顧客企業の中で開発パートナーとなる部署は、当初デモ実験に訪れた研究開発部署から生産設備開発部署、そして生産管理部署へと変遷していった(図 6.7)。

この過程において、顧客要求は ULEB 出力や、処理幅などの技術要求から、耐久性、メンテナンス性、ランニングコストなど、顧客ニーズ自体が全く異なる分野へと変化していった。この a のプロセスで行われた開発においては、大幅な開発の見直しと短期間での対応を迫られるような大きな紛糾はほとんどなかったが、段階的に行われた製品開発と顧客ニーズのフィードバックのプロセスには比較的長期間を要するものであった。

・パターン b

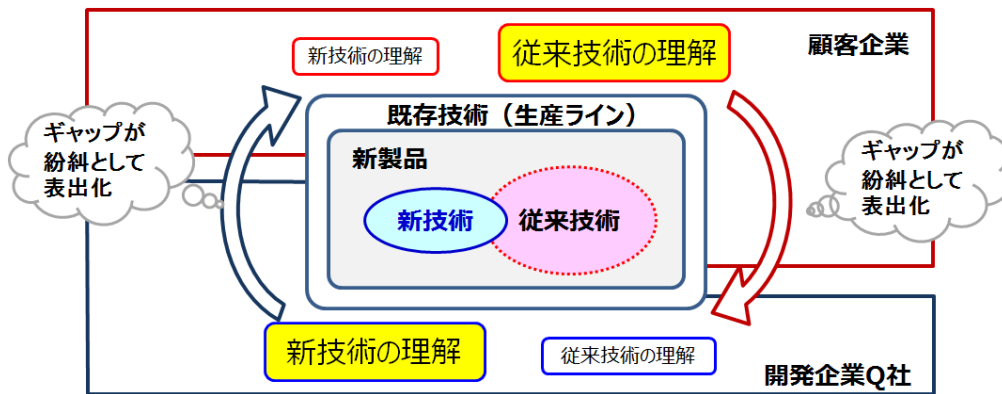


図 6.8 ULEB 照射源販売事業で経験した試作品開発プロセス：パターン b

もう一つの事例は、原理実証試験の結果がほぼインラインで求められる効果を満たし、かつ試作品 2 がわずかな改良によって生産ラインに適用できると判断されたものである。この事例では、試作品 2 が細部の改良を経て実生産ラインに搭載される形で実証が行われた。このパターンにおいて注目すべきは、この試作品段階で実生産ラインに搭載されることで Q 社および顧客の双方が当初想像できなかった紛糾が発生したことである (図 6.8)

試作品から市場投入に至ったプロセス a、b の両事例ともに共通しているのは、開発に必要な技術的ハードル、求められる対応期間などの差こそあれ、製品開発のどの時点でも (生産現場投入を経てもなお)、不測の紛糾が発生したことである。そうした紛糾の原因は、ひとつは顧客が長期的に使用していくにあたって必要なコストや性能管理に対するものであり、もうひとつは顧客が ULEB 照射源を使用する方法や設置環境による ULEB 照射源への外乱などである。これらはいずれも ULEB 照射源以前の既存技術を使用していたユーザにとっては日常的かつ常識的な要素であるにもかかわらず、Q 社はこれらを事前に把握することができなかった。その理由は、顧客担当者が ULEB 処理技術を、Q 社担当者が既存技術を理解していく上で、コミュニケーションによって相互の新旧技術に対する認識レベルを確認することができなかったためである。しかし、そうした紛糾から発生した問題を解決することにより、最終的にはこれらのプロセスを経たことで安定して生産ラインで稼働できる製品として完成に近づいていった。

6.6 開発プロセスの分析

6.6.1 先行研究をフレームワークとした分析

ULEB 照射源販売事業の事例を先行研究のフレームワークに基づいて分析すると、リニア・モデル的な要素とノンリニア・モデル的な要素の両方が含まれていることが判る。Q 社の製品開発・設計業務は ISO9000 の品質マネジメントシステムに則ったデザインレビュープロセスに支援されている。製品開発においては、顧客要求に基づいた仕様のインプットやその設計検証作業が明確に義務付けられており、顧客の声を聞き、その要求に基

づいた仕様を決定し、必要な設計を行い、検証して、顧客要求を満たす製品品質を保証するという決定論的な視座に立ったものであるといえる。そこには、細分化されたプロジェクトにおける各段階が一方向に順次進むリニア・モデル的な構造がある。一方で、前節で記述された通り、これまでの ULEB 加工装置開発をマイクロな視点も含めて俯瞰してみると、製品開発プロセスの多くの時点において、いくつかの非決定論的な要素が伺える。製品開発は、その都度変遷する顧客要求をフィードバックする作業がミクロ的に各所に内抱された連鎖モデル的なプロセスとなっており、当初想定した計画とは異なった多くの紛糾が発生した(図 6.7、図 6.8)。先行研究に基づいて分析するにあたり、リニア・モデル的な要素とノンリニア・モデル的な要素の融合に注目し、組織認識論 [25]、および技術システムの構造化理論 [27] を援用した。

まず、組織認識論 [25] を援用することで製品開発の進捗によって開発者と顧客、それらが製品に対する認識が変化していった過程を分析した。開発過程で入手する情報に基づいて逐次的に試作品開発を繰返す中で、試作品(製品)の変化(改良)に伴って、ULEB 照射源または電子線処理技術に対する顧客の認識は変化し続けた。この認識の変化に対し、行為主体である人間や組織を、情報を処理するという観点のみからコンピュータのような合理的な存在として捉えようとするのでは、各行為主体の製品・技術に対する認識の変容は説明できない。人々を取り巻く社会的文脈や、製品開発の主体となる個人・組織におけるものの見方や考え方のダイナミックな変化を捉える必要がある。組織認識論 [25] によると、開発者が顧客に伝えようとした意味は、その通りに誤解なく伝えられるとは限らない。開発者の行為が製品を通じて顧客に伝達される過程で、伝えようと意図した意味以上に多様な情報を発生させるからである。例えば ULEB 照射源が「インラインに対応できる」とする開発者側の情報発信を生み出す認識は、開発当初の「小型である」という認識から「幅広く照射できる」、「高速処理に対応できる出力を備える」に変遷し、さらに「メンテナンス間隔が長い」、「日常管理が簡便である」ということまで含むようになっていった。しかし、これら認識は顧客側にとっては最初から「インラインに対応できる」ということの意味として認識されていたのである。そして、この開発フェーズとともに経時的に変遷していく開発者側と顧客側相互の「インラインに対応できる」という認識のずれが、開発現場を取り巻く状況にそぐわなくなったとき、紛糾として表出化したと考えられる。

次に加藤 [27] の「技術システムの構造化理論」の枠組みに基づいて本プロセスを分析すると、ノン・リニア・モデルの特徴である非決定論的な視座を基本としながらも、決定論的構図が部分的に生じる状況が説明できる。ULEB 照射源開発の初期段階においては、Q 社が認識していた ULEB 技術応用分野(インライン薄膜加工など)に対する「解釈」は真の市場要求によって規定されていなかった。その当時に Q 社が収集した、限定された市場情報に依拠した開発者側の認識によって様々な解釈がなされていた(図 6.4: 解釈の開放状態)。ULEB 照射源、ULEB 照射技術に対する複数の解釈(図 6.4: 製品の可能性)は、試作品 1 の完成とともに開発者と複数の顧客との間で共有されることになり、インライン搭載する ULEB 照射源に求められる仕様として収斂していった(図 6.4: 解釈の安定化)。製品仕様が決定され、技術の解釈とそれに基づく技術システムが安定化してくる段

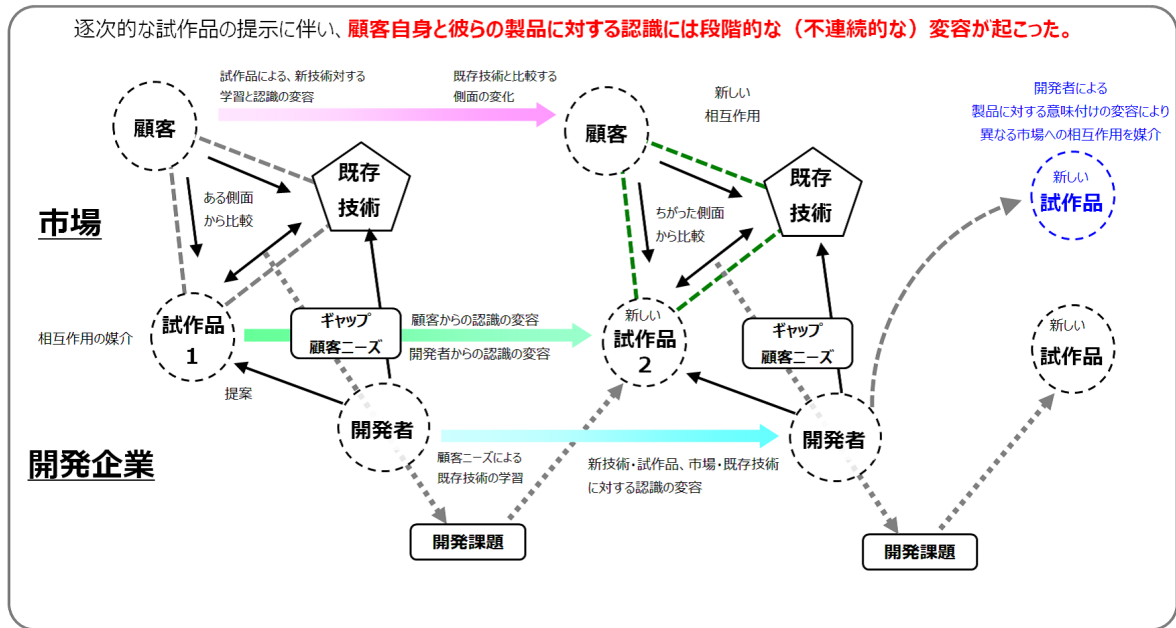


図 6.9 ULEB 照射源開発における開発者と顧客の対話プロセスの概念的記述

階、すなわち最終的な生産現場に採用されて運用されている段階においては、「開発者の持つ既存技術と ULEB 照射源が使用される環境の知識」と、「顧客が持つ ULEB 照射源とその関連技術に対する知識」が開発当初ほど乖離していない。両者の認識のギャップは少なくなり、大きな紛糾の発生はなくなりつつある。この後は、開発期間の短いデバッグ作業や、顧客要求に基づく性能向上、コストダウンなどの改良作業が中心となる決定論的なプロセスに収斂すると推測することができる。

以上のように、製品開発に関する先行研究で示されたフレームワークを用いて ULEB 照射源販売事業におけるこれまでの製品開発を記述し、解釈することができた。

6.6.2 開発プロセスの概念化による不確実性をもたらす構造の分析

ULEB 照射源開発プロセスは、試作品を媒介とした開発者と顧客との対話であり、その対話を通じて、製品開発者、製品（試作品）、顧客が変容していったプロセスであったといえる。ULEB 照射源開発における開発者と顧客の対話プロセスを開発者、顧客と製品の各要素によって概念的に記述することで、発生した紛糾の原因となった不確実性をもたらす構造を分析した。図 6.9 の流れに従い、ULEB 照射源の開発プロセスを開発者、顧客、製品（試作品）、既存技術とその関係性に注目して説明する。

ULEB 照射源開発の初期段階では、具体的な製品（試作品）が無いために、顧客側も新技術を十全に理解することができず、詳細な顧客ニーズは潜在したままであった。当時 Q 社が収集した、限定された市場情報に依拠した開発者側の認識によって製品仕様（開発目標）が決められていた。試作品 1 が完成し、それが顧客に提示されたことで、顧客は初めて自分達の既存技術（熱、紫外線処理など）と ULEB 照射技術を比較することが可能に

なった。顧客が実際に試作品 1 を使用して初めて、既存技術と新技術のメリット、デメリットが表出化した。顧客は新技術に対する学習をより深めることができ、顧客の既存技術に対して試作品 1 に不足していた性能は、より具体性を持つ顧客ニーズとして顕在化した。同時に新技術が既存技術と比較して優れている点(省電力、耐環境性など)もまた、具体的に顧客に認識されるようになった。Q 社も既存技術や市場に対する認識を改め、ここで顕在化した顧客ニーズを市場適合のための技術目標として次期試作品の仕様を設定し、試作品 2 の開発に移行した。

試作品 2 以後の顧客とのコミュニケーションにおいても同様のプロセスが発生するが、ここで顕在化する顧客ニーズとそれに基づく新しい開発目標は、試作品 1 で発生した課題とは異なる側面にフォーカスしたものとなる。試作品 1 の不足点が補われた試作品 2 の使用段階では、顧客は試作品 2 を新しいフェーズでより発展的かつ実使用に近づいた検証を行う。ここで注目すべきは、その検証に従事する部署や担当者も変化することである。そのような顧客側組織、個人の変化は、顧客全体の新技术に対する認識を変容させ、既存技術と比較する対象分野を変化させる(例：性能からコスト、コストから管理性能など)。試作品 1 を介して発生した技術的仕様の向上(例えば出力の増大など)をさらに追求するような開発でなく、要求仕様の質が変化した。また、この段階では従来技術とは異なる新技术ゆえの独特な課題も発生した(例：放射線を発生することによる弊害など)。

一方で、Q 社においては、ULEB 照射源という製品に対する認識だけでなく、大量生産ラインの設備技術と ULEB 照射源の適合性に対する認識も変遷していった。しかし、プロセスのどの時点においても、最終的な製品仕様がどこに落ち着くのかは、Q 社単独では設定できないだけでなく、ULEB 技術を十分に学習しきれていない顧客も理解できていなかった。最終的な製品仕様は、顧客が試作品の使用で得た経験と、それがもたらした顧客ニーズの顕在化という応答を Q 社が確認し、次の試作品で具現化することで徐々に収斂していくものであった。

さらに、「開発者による製品の意味づけ」という視点から試作品開発プロセスを分析した結果、その変容も明らかになった。Q 社において最初に開発した試作品 1 では、薄膜硬化を目的とした電子線照射源として、「従来よりも低いエネルギー」の電子線を出力できる装置という意味づけであった。最初の「顧客要求」は、開発当初の開発者の知識と市場認識に基づいて市場を観察した結果として、開発者の中で生み出され、設計計画にインプットされたものである。この開発当初の設計目標を反映した ULEB 照射源が、その時 Q 社が ULEB 照射源に対して持っていた意味である。しかし、顧客との対話を通じて生産ライン適用のための技術仕様が明らかになるにつれ、Q 社はターゲットとする市場分野を限定せずに「インライン搭載可能な ULEB 照射源」というアピールを開始した。このことにより、当初の目的であった薄膜硬化プロセス以外にも様々な分野への事業展開が可能になった。この「製品に対する意味づけの変容」という視点については、既存のモデル・フレームワークでは、関係者間の相互作用や、それに伴う変容に関する説明はできるが、製品の意味や関係者の意識がどのように変容していくのか説明できるフレームワークは示されていない。新製品開発プロセス・モデルの研究ではないため本研究では議論しな

いが、増田 [34] は、開発プロセスにおける関係者間の相互作用により製品の意味が変容する過程を説明できる分析枠組みを提供している。

これまでの分析を通じて、ULEB 照射源開発プロセスで不確実性を生み出した構造について2つのことが明らかになった。一つは、紛糾として顕在化するまでその存在を認識できない、開発者側と顧客側の間にある既存技術、既存製品、または新技術、新製品に対する認識のギャップである。もう一つは、開発者、顧客、製品の変容と、さらに開発者による製品の意味づけの変容である。このような開発者と顧客の逐次的な相互作用のプロセスを経ているにもかかわらず、コミュニケーションで表出化できない認識のギャップは潜在しており、それが原因となり予期せぬ紛糾として表出化した。以上の分析から、顧客による製品と新技術の学習、Q社の市場と顧客に対する学習を含め、両者の製品に対する認識はどの段階においても完全に一致することがなかったことが示唆された。

6.6.3 製品開発に潜む不確実性の具現化とその低減に対する分析

前節で分析された不確実性のメカニズムを ULEB 照射源開発プロセスで経験した2つの生産現場適用までの過程 (6.5.2.5 : V-a, V-b) に適用することで、開発が紛糾した原因となった不確実性の具体化を試み、それがもたらすリスクとその低減策について分析する。開発の紛糾の原因となった不確実性は2つあったと考えられる。その一つは製品開発プロセスにおける開発者と最終使用者 (エンドユーザ) の組織的な構造である。Q社側の開発者は社内組織的に固定されていたのに対し、そのコミュニケーション相手となる顧客側は担当者だけでなく、その組織自体が変遷していき、製品に対する認識が個人から組織に至る枠組みを隔てて不連続に変化していた。この顧客側の個人および所属する組織の変化によって、顧客側には不連続かつ急激な認識の変化が発生し、それらが積み重なる。そして、新製品の真の能力と真の顧客要求のずれ、すなわち製品に対する相互の認識のギャップが表出化したとき、開発は紛糾したと考えられる。もう一つは、製品開発のために顧客側関係者とコミュニケーションを開始する時期である。顧客側には、ある一社の社内組織だけでなく、複数の企業が関係している場合もある。この場合、その企業間で新技術製品 (ULEB 照射源) に対する情報伝達が行われていたとしても、その組織のおかれる環境や、既存技術から ULEB 照射源への変更による利害関係によって、開発者とエンドユーザが接触するタイミングは必ずしも開発初期であるとは限らない。このようなプロセスを辿った場合、ULEB 照射源に対する開発者側、顧客側相互の認識・意味付けは、一社内の組織間におけるそれ以上に異なってくる。開発者とエンドユーザが初めて対面し、コミュニケーションをするような状況になった時、これまでに相互において形成されてきた新技術、既存技術に対する認識の大きな違いを製品がフォローできない場合は、それが紛糾として表出化した、と考えられる。

本事例においては、異なる環境・目的・製品に対する利害関係を有する複数の部署を順次媒介させるのではなく、開発初期から開発者とエンドユーザが直接コミュニケーションすることができていれば、開発の紛糾はなかった、もしくは低減できたのではないかと推

測できる。これに基づいて、「新規事業における新製品開発では、製品開発プロジェクトの初期の時点で、開発者と、その製品が完成し利用されるまでに関係するすべての部署の関係者が開発者とコミュニケーションを行った上で製品開発を進めて行くこと」により、予期せぬ紛糾による製品開発プロセスの攪乱を低減することができるのではないかと、という仮説を立てることができる。一方で、実際には、顧客企業の経営組織上の事情や、企業自体が複数にまたがる場合もあるため、これは容易に解決できる問題では無いだろう。しかし、これまで経験した ULEB 開発プロセスを顧みると、「最初から知っていれば、もっと早く開発にフィードバックすることができ、紛糾も無かったのではないかと」というイベントを数多く経験したのも事実である。今後 ULEB 照射源の事業を継続して拡大するにあたって、新しい市場開拓は必須であり、再び未知の分野ゆえの推測に基づいた開発計画が伴う。そこでは、再び開発者と顧客の変容とそれがもたらす紛糾が予測される。経験学習モデル [29] によって記述された開発プロセスを顧みることによって得られる仮説を、次のプロセスで検証していくことにより不確実性は低減され、その後の開発プロセスを効率化させていくだろう。

ULEB 照射源の販売事業は、ULEB プロセスという新技術を、それまで経験していない市場に普及させるというイノベーションを伴うものであり、その実現には未知の分野に挑むことに伴う不確実性とそれがもたらすリスクに対処しなければならない。イノベーションは、創造の喜び、成功によって得られる利益と名声の大きさに対する期待がある一方で、常に不確実性が伴う [35]。不確実性がもたらすリスクに対処していくことがイノベーションの源泉である一方で、このリスクは事業開発にとって障害でもあるという一面もある。事業開発で遭遇した様々なリスクに対処した「苦労話」、「武勇伝」として語られているイノベーションの成功事例を崇めるだけでは、イノベーションのために真に克服すべき不確実性とリスクを見極めることは困難である。こうしたリスクをマネジメントできずに製品開発が紛糾し、事業継続が不可能になるような影響を組織的、経済的にこうむることもあるだろう。しかし、一度経験した紛糾の原因となったリスクの原因を分析し、「回避可能な」ものとして抽出・記述することで、以後同様の不確実性によるリスクは予測可能なものとなる。予測できるリスクに対処することで、イノベーション実現のために真に向き合うべき不確実性と、それがもたらすリスクの克服に事業開発のリソースを投入することができるようになる。未経験分野における製品開発プロセスに潜む不確実性とそれがもたらすリスクは経験に基づいて客観的に分析し、低減策を提案し実行していくことは、効率的な事業の推進とイノベーション創出に貢献できるだろう。

6.7 第 6 章の結論

第 6 章では、ULEB 照射源の販売事業を継続して拡大していくための、試作品開発プロセスの分析を行い、今後繰り返されるであろう未知の市場にむけた製品開発プロセスを効率化する手法を探った。ULEB 照射源の市場投入プロセスを先行研究のフレームワークに基づき分析を行い、開発作業に紛糾をもたらした「不確実性」にフォーカスして分析を

行った。ULEB 照射源開発における開発者と顧客の対話プロセスを開発者、顧客および製品という要素で概念的に記述することにより、紛糾の原因となった不確実性の構造的要因を分析した。その不確実性と紛糾の原因は、紛糾として顕在化するまでその存在を認識できない、開発者側と顧客側の間にある既存技術、既存製品、または新技術・新製品に対する認識のギャップであり、もう一つは、開発者、顧客、製品の変容と、さらに開発者による製品の意味づけの変容であった。

本事例を分析した結果、開発初期から開発者とエンドユーザが直接コミュニケーションすることができていれば、開発の紛糾は低減できたのではないかと推測できた。これに基づき、「新規事業における新製品開発では、製品開発プロジェクトの初期の時点で、開発者と、その製品が完成し利用されるまでに関係するすべての部署の関係者が開発者とコミュニケーションを行った上で製品開発を進めて行くこと」により、予期せぬ紛糾による製品開発プロセスの攪乱を低減することができるのではないかと推測された。今後の事業展開においても、経験学習モデル [29] によって記述された開発プロセスを顧みることによって得られる仮説を検証し、その過程でさらなる分析と新しい仮説-検証プロセスを繰り返すことで、不確実性に伴うリスクを予測し対処が可能になり、新規事業展開は効率化していくことだろう。

新規事業の製品開発を効率的に進めるためには、開発者と顧客が互いに未知の分野を模索するプロセスに潜む不確実性とそれに伴うリスクを漸次的に削減していけるプロセスを確立していくことが必要である。自社で未経験の新技术を伴った新製品を、自社が未経験の市場分野に販売しようとする新規事業は、未知ゆえの不確実性に起因するリスクを伴った障害が多く待ちうけている。この障害による「未知ゆえの苦勞」が、同様の製品を次なる新規分野に適用するプロセスで繰り返し経験されていくと、組織は疲弊し、開発効率が低下し、事業自体が失敗に終わるリスクが増大するだろう。一度経験した紛糾の原因となった不確実性とそれがもたらすリスクの原因を分析し、「回避可能な」リスクとして抽出・記述することで、事業開発の障害となりえた不確実性とリスクはマネジメントできるようになる。そして、新規事業の成功、イノベーションの実現のために真に向き合うべき不確実性とそれがもたらすリスクの克服に事業開発のリソースを投入することができるようになる。一方、本分析を通して得られた実践知に基づく製品開発のマネジメントプロセスを、製品開発の現場にどのように継続して継承していくか、その継承のプロセスおよび仕組みを作ることは今後の課題である。本分析は ULEB 照射源という限られた一事例について分析したに過ぎないが、未経験分野における製品開発プロセスに潜む不確実性とそれがもたらすリスクは経験に基づいて客観的に分析し、低減策を提案し実行していくことは、効率的な事業の推進とイノベーション創出に貢献できるだろう。

第6章の参考文献・引用

- [1] 大江 建『なぜ新規事業は成功しないのか：「仮説のマネジメント」の理論と実践』第3版 日本経済新聞出版社 (2008)
- [2] H. Igor Ansoff (1965). *Corporate strategy : business policy for growth and expansion*, McGraw-Hill. (広田寿亮訳『企業戦略論』産業能率短期大学出版部 1976年)
- [3] 庭本佳和 編著『経営学史叢書 IX アンソフ』 経営学史学会監修 (1990)
- [4] 窪田 祐一「創意工夫を促すマネジメント・コントロール：浜松ホトニクスの小集団部門別採算経営」『企業会計』 **67**(2), P248-256 (2015)
- [5] 河野 英子「研究開発型企業における社会的支援と成果管理 —浜松ホトニクスの事例—」『赤門マネジメント・レビュー』 13巻5号 (2014)
- [6] 松田修一『ベンチャー企業』日本経済新聞出版社; 第4版 P88 (2014)
- [7] 飛田幸宏「新規事業創造の企業戦略に関する一考察 —新規事業創造における社内ベンチャーの意義を中心に—」『高崎経済大学論集』 第43巻 第3号 P45-57 (2000)
- [8] 中原淳, 荒木淳子, 北村士朗, 長岡健, 橋本諭『企業内人材育成入門』ダイヤモンド社 (2006)
- [9] Peter M. Senge (2006). *The Fifth Discipline The art & Practice of the Learning Organization*, Crown Publishing Group. (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)
- [10] 田淵直也『不確実性超入門』ディスカヴァー・トゥエンティワン (2016)
- [11] Kees Van der Heijden (1996). *SCENARIOS – The Art of strategic Conversations*, John Wiley & Sons. (西村行功訳『シナリオ・プランニング 「戦略的思考と意思決定」』ダイヤモンド社 1998年)
- [12] Rothwell, R., Freeman, C., Horlsey, A., Jervis, V. T. P., Robertson, A. B., & Townsend, J. *SAPPHO updated-project SAPPHO phase II*. *Research policy* **3**, P258-291 (1974)
- [13] Cooper, R. G. *Identifying industrial new product success: Project NewProd*. *Industrial Marketing Management*,**8**(2), P124-135 (1979)
- [14] Cooper, R. G. *Project NewProd: Factors in new product success*. *European Journal of Marketing*, **14**(5/6), P277-292 (1980)
- [15] Maidique, M. A., & Zirger, B. J. A study of success and failure in product

- innovation: the case of the US electronics industry. *Engineering Management, IEEE Transactions on*, (4), P192-203 (1984)
- [16] 湯沢雅人「製品開発に関する先行研究の系譜」『横浜国際社会科学研究所』12(6), P829-850 (2008)
- [17] Kline, S. J., & Rosenberg, N. An overview of innovation. In R. Landau & N. Rosenberg (Eds.), *The positive sum strategy: Harnessing technology for economic growth* (pp. 275-305). Washington, DC: National Academies Press (1986)
- [18] 川上智子『顧客志向の新製品開発——マーケティングと技術のインタフェース——』有斐閣 (2005)
- [19] Kline, S. J. *Innovation is not a linear process* *Research Management*, **28**(4), P36-45 (1985)
- [20] Verworn, B., & Herstatt, C. *The innovation process: an introduction to process models*. Working Paper No.12, Technical University of Hamburg (2002)
- [21] Cooper, R. G. *Stage-gate systems: A new tool for managing new products*. *Business Horizons*, **33** (3), P44-54 (1990)
- [22] 田中政光『イノベーションと組織選択——マネジメントからフォーラムへ——』東洋経済新報社 (1990)
- [23] 山下裕子「場と秩序——ホンダの開発プロジェクトのグローバル化からの考察——」『マーケティングジャーナル』**10** (4), P35-43(1991)
- [24] 石井淳蔵, 『マーケティングの神話』日本経済新聞社 (1993)
- [25] 加護野忠男『組織認識論——企業における創造と革新の研究——』千倉書房 (1988)
- [26] 沼上幹『液晶ディスプレイの技術革新史——行為連鎖システムとしての技術——』白桃書房 (1999)
- [27] 加藤俊彦「技術システムの構造化理論——技術研究の前提の再検討——」『組織科学』**33**(1), P69-79(1999)
- [28] Abernathy, William J., and James M. Utterback. *Patterns of industrial innovation*. *Technology review* **80.7** P40-47 (1978)
- [29] Kolb, D. A. *Management and the learning process.*, *California Management Review*, **18**(3), P21-31 (1976)
- [30] Carlsson, B., Keane, P., & Martin, J. B. *R&D organizations as learning systems*. *Sloan Management Review*(Spring), **17**(3), P1-15 (1976)
- [31] 中原淳, 「経験学習の理論的系譜と研究動向」『日本労働研究雑誌』**55**(10), P4-14(2013)
- [32] 上野直樹『仕事の中での学習——状況論的アプローチ——』東京大学出版会 (1999)
- [33] 石井淳蔵, 『ビジネス・インサイト：創造の知とは何か』岩波書店 (2008)
- [34] 増田 靖, 「環境保全型『水道と農業』を可能にする 3R マテリアル『ポリシリカ鉄』の研究—変容する経営情報としての『語り』の視座から—」『経営情報学会誌』Vol.19 No.3, P203-219(2010)

- [35] 一橋大学イノベーション研究センター 編『イノベーション・マネジメント入門』日本経済新聞社 (2001)
- 中野 剛志、柴山 桂太 『グローバル恐慌の真相』 集英社〈集英社新書〉 (2011)

第7章

結論

本研究では、ULEB 照射源販売事業における技術的課題の解決と、今後の事業拡大のために製品開発プロセスを効率化することを目的とした経営学的分析を行った。

第1章では、本研究の社会的背景、研究動機および課題設定に至るまでの概要について述べた。第2章では、著者所属企業 Q 社が ULEB 照射源の販売事業を始めるに至った背景、および本研究が対象とする技術的課題が設定されていった過程を、放射線、電子線とその産業利用の歴史を踏まえながら述べた。第3章では、電子線の工業利用に置いて重要な役割を担う、線量測定技術について述べた。

第4章では、市販のラジオクロミックフィルム線量計 FWT-60-810 の応答を、2 MeV 電子線照射で校正して得た応答関数を用いて、加速電圧 50 kV、および 70 kV の ULEB 照射に対して 100 kGy までのエネルギー付与量を評価し、ラジオクロミックフィルム線量計の相対的エネルギー付与量は、10 kGy から 100 kGy までフィルム応答との線形性をもって推定することができることを明らかにした。また、モンテカルロシミュレーションコード PENELOPE によって計算された線量計へのエネルギー付与量は、2 MeV 電子線照射実験で校正された測定結果を 11 % の測定不確かさ内で再現した。同様に、ULEB 照射の場合においても、シミュレーションと実測値の差は 70 kV で 4.5%、50 kV で 14.4% でありいずれも測定不確かさの範囲内であり、ULEB 線量測定においても PENELOPE が有効であることを示した。この結果により、高エネルギー電子線で得たラジオクロミックフィルム線量計の応答関数を用いることで、ULEB の線量測定が測定不確かさの範囲内で相対的に評価可能あり、工業用 ULEB プロセスの設計段階で PENELOPE が使用できることを示した。

第5章では、加速電圧 43 kV から 70 kV までの ULEB 線量測定において、高エネルギー電子線で校正された FWT-60 線量計の応答関数から得られた吸収線量に、PENELOPE で計算された深度線量分布を適用することで、線量計内部の厚さ領域における相対的な線量分布を求めることができることを示した。この手法を工業用プロセスに応用することで、ULEB 照射プロセスの特徴である表面数 μm の線量評価が市販の線量計で可能になる。本手法により、プロセスにおいて硬化させたいコーティングの厚さ領域と放射線劣化させたくない基材フィルム領域の線量評価など、不均一な線量分布をもつ厚さ領域におい

て、線量計厚さ制限されることなく任意の厚さ範囲の評価が可能になる。この手法は、絶対線量による線量管理が必ずしも必要とされない工業用プロセスに ULEB を導入する場合のプロセス設計および線量計測システムの開発を従来より詳細に行うことを可能にし、応用範囲の拡大に貢献できる。

以上、上記研究によって、今後市場の拡大が見込まれている工業用 ULEB 照射プロセスの設計・評価技術を確立したことで、ULEB 照射線源の普及を加速させるための技術的基盤が構築された。今回確立した設計・評価技術により、従来課題であった産業用 ULEB プロセスに求められる電子線線量モニタリングシステムなどの線量測定装置開発に着手することが可能となり、ULEB 照射源の大量生産プロセス搭載への見通しを得た。将来的な工業用 ULEB プロセスの普及は、電子線照射でのみ可能な新たな新材料開発、工程開発に留まらず、そのプロセスが持つ対環境性というメリットにより社会に大きく貢献することができる。

第 6 章では、自社の限られた知見と情報収集に基づいて手探りの状態で始めた未知の分野での新規事業が、どのようなプロセスを辿ってきたかを定性的に記述し、そこで起きた紛糾とその原因となった不確実性を明らかにすることによって、今後の事業開発における不確実性を回避するための仮説を提案した。得られた仮説とその検証プロセスを継続して実践することで、正確な市場ニーズを早期に把握でき、製品開発初期から技術開発項目を決定でき、開発の紛糾を回避または削減できる。その結果、製品開発のリソースは、確実性の高い市場ニーズを実現させるための開発活動と、未経験の市場に待ち受ける新たな不確実性の克服のために投入することができる。こうして未知の不確実性に対して継続して立ち向かう環境を整えていくことは、同じ紛糾を出来る限り避けるための指針となり、今後も事業拡大とともに同様の記述と仮説検証を継続していくことで新規事業推進の効率向上とイノベーション創出に貢献できる。

電子は荷電粒子であり、ULEB 照射プロセスは電子と物質間のさまざまな電磁相互作用の結果としてもたらされる産物であり、それを媒介しているのは光子（光子）である。ゆえに ULEB 照射源の応用分野を拡大し、その販売事業を継続していくことは、新しい光産業を創成していくことである。ULEB 照射源販売事業は、自社シーズ技術である工業用エックス線管の技術と社会背景から生まれた薄膜加工プロセスのニーズによって始まり、一分野の市場を確立しつつある。こうした事業継続の過程で培われる新技術は、自社のあらたな技術シーズとなり、新しい社会的背景及びニーズと融合しながら新規事業のサイクルを継続させていくことを可能にし、さらなる新産業の創成に貢献できる。

研究業績

主論文

- [1] S.Matsui, Y.Mori, T.Nonaka, T.Hattori, Y.Kasamatsu, D.Haraguchi, Y.Watanabe, K.Uchiyama, and M.Ishikawa
Energy deposition evaluation for ultra-low energy electron beam irradiation systems using calibrated thin radiochromic film and Monte Carlo simulations,
REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, Vol.87, No.5, 053309(2016)
- [2] S.Matsui, T.Hattori, T.Nonaka, Y.Watanabe, I.Morita, J.Kondo, M.Ishikawa and Y. Mori
Measurement of relative depth-dose distribution in radiochromic film dosimeters irradiated with 43–70 keV electron beam for industrial application,
RADIATION PHYSICS AND CHEMISTRY, **146C** (2018), pp. 91-95

学会発表

- [1] 産業用超低エネルギー電子線照射プロセスにおける薄いラジオクロミックフィルムとモンテカルロシミュレーションを用いた線量評価方法
○松井信二郎、森芳孝、野中崇、服部剛明、笠松雄治、原口大、石川昌義
日本原子力学会 2015年春の年会
2015年3月21日 茨城大学 日立キャンパス
- [2] 薄いラジオクロミックフィルムとモンテカルロシミュレーションによる深度線量分布を利用した超低エネルギー電子線照射におけるエネルギー付与量の評価
○松井信二郎、服部剛明、渡辺祐貴、森田一平、稲鶴和也、石川昌義、森芳孝
日本原子力学会 2016年秋の大会
2016年9月8日 久留米シティプラザ
- [3] ラジオクロミックフィルムとシミュレーションによる深度線量分布を利用した超低エネルギー電子線照射のエネルギー付与量評価
○松井信二郎、渡辺祐貴、森田一平、近藤淳一、服部剛明、稲鶴和也、石川昌義、森芳孝
第59回放射線化学討論会
2016年9月21日 量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所

- [4] 産業用超低エネルギー電子線照射プロセスのためのラジオクロミックフィルムによる線量測定とモンテカルロシミュレーションを利用した線量計内部の深度線量分布の再現性評価
○松井信二郎，渡邊祐貴，森田一平，近藤淳一，服部剛明，石川昌義，森芳孝
第 16 回放射線プロセスシンポジウム
2016 年 11 月 8 日 東京大学農学部 弥生講堂
- [5] 既存製品のコア技術から派生した異分野新製品の開発とマーケティング ―小型放射線加工装置の事例研究
○松井 信二郎、森 芳孝、増田 靖
経営情報学会 2015 年春季全国研究発表大会
2015 年 5 月 31 日、日本大学 生産工学部
- [6] 既存技術を応用した新製品開発新市場参入プロセスに関する一考察
○松井信二郎、森 芳孝、増田 靖
経営情報学会 2016 年秋季全国研究発表大会
2016 年 9 月 15 日 立命館大学 大阪いばらきキャンパス
- [7] 新規事業における製品開発プロセスでみられる学習と不確実性に関する一考察
○松井信二郎
2017 年度 第 1 回 IMI 研究会（経営情報学会 組織ディスコース研究部会）
2017 年 5 月 14 日 光産業創成大学院大学

謝辞

私が博士論文を完成させることができたこの素晴らしい瞬間は、私個人と出会い、私の人生という物語の文脈を形成したすべての人々、社会、自然の恩恵によるものです。光産業創成大学院大学に入学して以来、私は博士研究というこれまでの業務とは異なる舞台に立ち、その役割を演じ続けた結果、自身の内なる世界は大きく成長し、変化を遂げたと感じています。ここに、博士研究活動を通じてご協力頂いた皆様に感謝の気持ちを綴らせて頂きます。

指導教官の先生方のご指導なくして、私が技術研究・経営分析を遂行し、本論文を完成させることはできませんでした。5年間にわたって技術研究・経営分析を含めた研究活動全般にわたるご指導だけでなく、博士という学位の意義から査読付き論文の執筆、プレゼンテーションに至るまで懇切丁寧なご指導を頂いた、森芳孝先生に心より感謝申し上げます。本研究の動機から結論に至る確かな道筋は、先生のご指導と、先生との議論を通して得られた気づきによって私にもたらされたものです。先生のご指導によって、私は学術研究の意義とその価値を再認識することができました。所属企業での業務を行いながら研究をする私の負担に対しても日々ご配慮を頂いたおかげで、私は安心して研究を遂行することができました。先生からご指導頂いた5年間で私が得た新たな知見は、必ず今後の私の人生、所属企業における業務に活用できると確信しています。本当にありがとうございました。また、社会科学、人文科学から自然科学に至る幅広いご見識に基づいて、本論文における経営分析をご指導頂いた増田靖先生に感謝申し上げます。私が所属企業の業務で抱いていた問題意識を博士研究の課題として分析を行えたのは、先生との社会科学研究に関する多くの議論と、先生の親身で粘り強いご指導のおかげです。さらに、入学から2年間、経営分野の授業、ゼミを通してご指導頂いた高橋宏誠先生は、自然科学的な思考方法しか持たなかった私を社会科学の世界に誘い、その扉を開いてくれました。両先生のご指導を通じて学んだ、現象に対する社会科学的なアプローチや、人間をしっかりと見据え、時に人間を主体とした世界観に触れたことで私は大いに刺激を受け、今後の人生に臨む大いなる勇気と希望を見出すことができました。ありがとうございました。

私が所属企業での業務をしながら博士研究を行うという環境に置かれつつも、研究を遂行することができたのは所属企業の上司・同僚の皆様のおかげです。私にこの貴重な機会と時間を頂いたのは、所属企業の竹内純一様、鈴木賢次様、高林敏雄様、石川昌義様のおかげであり、感謝の念に堪えません。さらに、私が日常業務をしつつ、安心して研究できる環境を得られたのは、内山圭吾様、松村達也様、木村純様、内山日出夫様、山本徹様、服部剛明様、原口大様、野中崇様、笠松雄治様、渡辺祐貴様、森田一平様、稲鶴和也様のおかげです。在学期間中に皆様から頂いたご支援に心から感謝いたします。研究活動で得た経験と知見に基づいた新しい自分自身によって、そしてこの感謝の気持ちを忘れることなく、今後の所属企業の発展に貢献していくという決意を新たにしました。

また、本研究における技術研究は、国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所 清藤一様、ビームオペレーション株式会社代表取締役社長 小嶋拓治様による電子線の線量測定技術に関するご指導無くして達成することができませんでした。両氏に心より感謝申し上げます。

そして、博士研究の主たる舞台である光産業創成大学院大学の皆様に感謝の気持ちを述べさせていただきます。本論文は、光産業創成大学院大学 内藤康秀先生、横田浩章先生による丁寧かつ貴重なご助言によって完成させることができました。改めてお礼申し上げます。藤田和久先生には、光エネルギー分野での活動を通して、技術研究、経営分析ともに入学当初から多くのご指導、ご助言を頂きました。瀧口義浩先生、坪井昭彦先生、江田英雄先生、石井勝弘先生、姜理恵先生、沖原伸一郎先生、花山良平先生、平野美奈子先生、楠本利行先生からは、本論文の予備審査での確なご助言を頂いただけでなく、研究活動以外においても学生生活の様々な場面で貴重なアドバイスを頂きました。宇佐美建一先生からはマーケティングに関して様々なものの見方、考え方をご教授頂き、私は自身の考え方、業務への取り組み方を見直すことができました。北川米喜先生の講義やゼミを通じて、私は物理学を改めて深く学び直すことができ、光と物理学に対する内なる好奇心は大いに刺激され、本論文の技術研究の活力となりました。博士研究を遂行し、本論文を完成できたのはすべての先生方のご指導のおかげです。心より感謝いたします。さらに、私が5年間不自由なく研究に専念できる素晴らしい環境が整えられていたのは、大学事務局の皆様のおかげです。伊藤邦司様、村田浩二様、石山貴之様、大西秀美様、菅沼聖子様、加藤奈穂様をはじめ、事務局・職員の皆様にお礼申し上げます。光エネルギー分野および先端光産業経営分野のゼミでともに学んだ皆様、そして入学以来共に切磋琢磨してきた9期生の学生の皆様にも心から感謝致します。また、同じ研究室に所属し、所属企業でも同期入社であった松本直哉様と共に活動できたことは学生生活の多くの面で心の支えとなりました。皆様、本当にありがとうございました。

最後に、私がいま、光産業創成大学院大学で学び、所属企業でその務めを果たしていることに対して、所属企業の晝馬輝夫名誉会長、晝馬明社長、大塚治司相談役、および光産業創成大学院大学の加藤義章学長に心より感謝申し上げます。そして、私を育て、私の望み通りの教育の機会を与えてくれた両親、兄、祖父母と、私の健康を維持し、研究生活を支えてくれた妻 愛子、いつも明るい笑顔を絶やさないでいてくれた長男 信鷹、長女 清良に感謝し、本研究を回顧した私の心に湧きあがる感謝の気持ちの結びといたします。

ありがとうございました。

2018年3月1日
松井信二郎