

平成16年9月修了
博士（工学）学位論文

大出力電子線加速器の実用化システム構築とその事業化
- 500MHz RF システムの開発 -

Creation and Commercialization of Utilization Systems
using High Power Electron Accelerators
- Development of 500MHz RF System -

平成16年6月18日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻（起業家コース）

学籍番号 1056009

牧田 陽

Yo Makita

要旨

本論文は、筆者が三菱電機（株）先端技術総合研究所にて研究開発を行ってきた大出力電子線加速器“ CW マイクロトロン ”に関するものであり、主要構成機器のキー技術である 500MHzRF システム構築のための基礎的研究から、CW マイクロトロンによる民生市場創出のための事業戦略の策定、事業化の実践までの研究成果をまとめたものである。論文は大きく分けて以下より構成される。

1. 加速器技術の発展と電子線加速器の工業的実用化の現状と課題（第 1、2 章）
2. 一般消費市場創出のための大出力電子線加速器実用化システム構築（第 3 章）
3. 大出力電子線加速器による一般消費市場（食品照射事業）創出の実践（第 4 章）

第 1 章

荷電粒子を高エネルギーに加速する粒子線加速器の用途は、主として科学技術振興を中心に貢献してきた。1930 年代に世界で初めて加速器で人工的に加速された粒子を使って原子核反応実験が行われて以来、世界各国の研究機関で加速器の導入がすすみ、原子核物理学、素粒子物理学に代表される現代物理学は目覚ましい進歩を遂げた。本章では Livingston Plot に代表される加速器科学および加速器産業の誕生から現在に至るまでの変遷を論じる。

加速器科学発展の副産物として、原子力産業分野、放射線がん治療に代表される医療分野、およびゴム材、ケーブル被覆材等の材料改質に代表される工業利用分野への貢献が近年精力的になされてきたが、筆者はこれらの最先端技術による民生産業への応用、特に消費者市場への実用化が十分になされていないという点を指摘し、本研究の目的を明らかにした。本研究では、電子線加速器による一般消費市場創出のための実用化システムを構築し、民生市場における新たな継続的利益を生み出す事業を創出するための具体的実践方法を策定し、実践することを目指した。

要旨

第2章

加速器科学の産業界への貢献の中で、電子線加速器の工業利用の現状を採り上げ、実用化技術の現状を分析し、一般消費市場における普及への課題を論じる。

加速エネルギー 300keV ~ 3MeV の中低エネルギー領域では、1950年の英国でのポリエチレンの放射線架橋の発見以来、ラジアルタイヤ、配線用電線・ケーブルに代表される材料改質や、脱臭、印刷技術を中心に、今日までの50年の間、多岐に渡り実用化されてきた。しかしながら加速エネルギー 5MeV 以上の高エネルギー電子線においては、滅菌や殺菌の応用例があるものの、十分な成長を示していない点を筆者は指摘し、その原因が加速器自身や周辺設備の顕著なコスト増加であり、普及への課題として大出力化、高効率化、コンパクト化、低コスト化が必要であることを指摘した。

第3章

第2章で指摘した課題解決のため、普及型のコンパクトな大出力電子線加速器“CW マイクロトロン”を考案した。筆者は、加速器の主要構成機器である500MHzRF システム構築のための基礎的研究を行い、マイクロトロンへの適用を実現した。本章では、その研究成果をまとめる。

大出力電子線加速器の代表的なものとしては静電型加速器が一般的であるが、高エネルギー化するにつれ大型化し実用性に欠ける。一方、加速エネルギー 5MeV 以上の高エネルギー領域においては、一般に線形加速器に代表されるRF 加速器が一般的である。その中でも周回加速型のマイクロトロンは電力効率性の観点から、第2章で指摘した課題を解決する上で最もふさわしい加速方式であると考えられる。マイクロトロンには一般に S-band 帯 (2.8GHz) のRF システムが採用されている。現状の技術ではRF 加速空洞の熱的問題等から大出力化に限界がある。従って、これを解決するためにRF 加速空洞の周波数を下げ、加速空洞寸法を大きくし、冷却効率を高めることで熱的問題を解決し大出力化を実現することとした。

一般に、周波数を下げるとは加速器のコンパクト化に逆行することになるが、500MHz 帯を採用することで全体構造としてはコンパクト性を保ち大出力化が可能であることを明らかにし、加速条件を満足するための加速空洞および電磁石や他構成機器の技術課題を明確にした。

従来、500MHz 加速空洞は放射光施設に代表されるシンクロトロンに用いられるが、

これを新たにマイクロトロンへ導入した。コンパクト性を保つためには、加速器システムは 80keV 程度の低エネルギー入射が必須となるが、その際、電子線は光速の 1/2 の速度 ($v/c=0.5$) であり、加速と共に速度が変化する事を考慮した設計が不可欠となる。これを解決するために、高周波解析と電子ビーム周回加速シミュレーションの連成解析による加速空洞構造の設計最適化手法を確立した。

また、製作に当たっては、従来検証用として製作されてきた試作機を製作せず、厳密な高周波解析および熱構造解析を実施することで、直接設計から実機製作が可能となる設計手法を開発し、初めてマイクロトロン導入した。

一方、RF 電源は放送機器で用いられる IOT 管をマイクロトロンに初めて適用した。IOT 管は従来 RF 電源として用いられてきた電子管やクライストロンと比べ高電力効率であり、また管の取扱いもプラグインでの交換が可能であり産業応用に適している。

更に、大出力時に通常用いられる導波管による RF 伝送系に、コンパクトな同軸管を適用し、RF 電源への反射電力のビーム電流に対する依存性を厳密に評価し、最適な RF カプラ結合度を選択することで、電力反射吸収のために必須であるサーキュレータを用いない大出力電子線加速器システムを構築した。その結果、これまでに無いコンパクト化、および低コスト化を実現した。

これらの RF システムを組合せた RF 加速空洞の大電力試験では、大出力化に必要なとする要求を満足する結果を得た。更に、電磁石、電子銃、ビームモニタ等の他のサブシステムと組合せてのビーム加速実験を行い、加速エネルギー 5MeV の出射を確認した。

第 4 章

大出力電子線加速器 CW マイクロトロンによる一般消費市場創出を目的とした、食品照射市場への展開をターゲットとした事業化実践について論じる。

第 1 章、第 2 章で述べたこれまでの加速器産業を振り返り、がん治療に代表される医療応用の例、および電子線加速器の工業応用の例を経営学的に考察し、これらがクリステンセンのいう「新市場破壊型技術革新」の事例と、よく一致する事を指摘した。そして、CW マイクロトロンによる食品照射への展開が新市場破壊型事業として有望であることを指摘し、事業化戦略を策定した。

食品や植物の殺虫や殺菌手段として、化学処理法や加熱処理法に代表される従来処

要旨

理法は、化学物質として用いる臭化メチルによる環境破壊、加熱処理による食料の品質劣化が指摘されており、臭化メチルに関しては2015年に全世界での撤廃が国際条約によって決まっている。これらに代わる手段として、コバルト60や電子線加速器を用いた放射線照射による殺虫・殺菌処理が有望であり、現在、中国国内においてはコバルト60による16のガンマ線照射施設が稼働している。

そこで、コバルト60による照射処理法について、設備投資額、年間照射処理量、電力コスト、人件費、保守コスト、および保険料等を考慮に入れた照射処理コストを見積り、電子線照射処理法による照射処理コストと比較した。そして、CWマイクロトロンによるコバルト60照射装置入替えのための財務戦略を、ディスカウントキャッシュフロー法を用いた事業価値分析手法に基き策定し、採算性のある有望な事業となることを確認した。

事業の展開戦略としては、“1. 老朽化したコバルト60を用いた施設の入替え”、WTO加入後政策として東部に開発が進められている“2. 東部農産物輸出基地への展開”を図る。更に次のステップとして、食品照射により得られる効果の一つである成熟抑制を利用し“3. 西部ハブ都市への展開”を図り、学術振興の牽引を中心として担ってきた加速器産業において、一般消費市場を新たに創出する。

第5章

研究成果を総括して、本研究の結論を述べる。本研究では、これまで科学技術振興を中心に貢献してきた加速器産業において、一般消費市場創出のための技術課題を明らかにし研究開発を行った。そして、大出力CWマイクロトロンの500MHz RFシステムを構築し、これまでの大出力電子線加速器を刷新する実用的新システムを構築した。

現在、食品の殺虫・殺菌事業において、民生事業創出を目指し、新たな事業戦略を策定し、事業化実践を進めている。

Summary

This thesis deals with a high power electron accelerator "CW microtron" that the author has developed at Advanced Technology R&D Center in Mitsubishi Electric Corporation. It describes the research result of the research and development of 500MHz RF systems of the CW microtron and the commercialization of the utilization system using the CW microtron. The thesis consists of the followings:

1. Current status of the accelerator technology and the issue of the industrial usage of electron accelerators (Chapter 1 and 2)
2. Research developments of 500 MHz RF systems for CW microtron (Chapter 3)
3. Practice of commercialization on the general consumer market (Chapter 4)

Chapter 1

The use of the particle accelerator, which accelerates a charged particle, has played an active part mainly for science and technology promotion. Since a nuclear reaction experiment was conducted by using a particle accelerator for the first time in the world in the 1930s, introduction of an accelerator has progressed at research organizations in the world. The modern physics represented by nuclear physics and elementary particle physics has accomplished remarkable progress by using particle accelerators. This chapter discusses the transition of the accelerator science represented by Livingston Plot, and the birth of the accelerator industry.

The contribution to the industrial use, such as a nuclear power industry, a medical treatment field represented by radiation cancer therapy and a material reforming field represented by the rubber material and the cable coating material etc. has been

Summary

performed actively as a by-product of the accelerator science development in recent years.

The author pointed out that a practical use of the state-of-the-art technology to the public welfare industry, especially the consumer market, has not been performed effectively enough. Therefore, the research is aimed to construct the utilization system of the electron accelerator for the general consumer market creation.

Chapter 2

The current status of industrial use for the electron accelerator is considered as an example and the present condition of utilization technology is discussed. Furthermore, the issue to spread in a general consumer market is discussed.

A bridge of polyethylene by using irradiation was discovered in UK in 1950s. After the invention, the material reforming technique has been developed to practical use, such as, the radial tire, the cable, and the curing technique until today over many topics. The author pointed out that commercialization of accelerators in the energy above 5MeV does not show sufficient growth despite there should be a usage as sterilization equipments and so on. It was found out this is due to the remarkable increase in cost of the accelerator and circumference equipments.

Thus, The author clarified there is the needs for increasing the beam power, obtaining the higher power efficiency, making the machine compact, lowering the cost as the issue to spread.

Chapter 3

The compact and high power electron beam accelerator "CW microtron" of the spread type was designed as the solution of the technical issue pointed out in Chapter 2. The author has performed a fundamental research for 500MHz RF system, which is the main composition equipment of the accelerator, and realized the system to practical use to a microtron. In this chapter, the result of the research is summarized.

A DC type accelerator is common as a typical high power electron accelerator, however, its volume enlarges as acceleration energy is increased and practicality is lost.

An RF accelerator is generally common in the higher energy region above energy 5MeV. The author considers a CW microtron with recirculation acceleration type is one of the most suitable acceleration methods from the viewpoint of the electric power efficiency.

An S-band (2.8GHz) RF system is usually adopted as an RF system of microtron. However, there is a limit to obtain a high power beam, due to the thermal problem of the RF cavity. The author has chosen the lower resonant frequency of the RF cavity. Lower resonant frequency enlarges the size of the cavity and improves the cooling efficiency. Therefore, it solves the thermal problem when increasing the beam power.

Lowering the frequency moves against miniaturization of an accelerator. However, the author have found that choosing a 500MHz maintains the accelerator compact, and clarified the technical issue of the RF system for satisfying acceleration conditions. The design optimization technique of the RF cavity by a coupled analysis of the RF analysis and the electron beam acceleration simulation was established and the cavity structure was optimized.

An Inductive Output Tube (IOT), which has been commonly used with the broadcasting, was chosen as the RF power supply to CW microtron. The IOT has higher electric power efficiency compared with an electron tube and a klystron that has been widely used as RF power supply so far. The author suggested that the easy handling of the tube is suitable for industrial applications since exchange with the plug-in is possible etc.

Furthermore, the coaxial tube was applied to RF transmission line instead of using a waveguide, which is commonly used for high power RF transmission line. The reflective electric power to RF power supply was evaluated strictly and the optimum position of the RF coupler was selected so that use of the circulator is omitted. As a result, the author demonstrated making the machine compact and lowering the machine cost.

In the high power test of RF cavity, the result of satisfying the needed power, 40kW, was successfully obtained. Furthermore, beam acceleration experiments were conducted and acceleration energy 5MeV was confirmed.

Summary

Chapter 4

The commercialization of food irradiation business by using the CW microtron is discussed.

At first, the author looked back on the current accelerator industry. The example of medical treatment application and the industrial application of electron beam accelerator were considered in business administration. Then, it was pointed out that the example corresponds well with "New-Market Disruption" that C. Christensen implies. Furthermore, it was considered that commercialization of the food irradiation by the CW microtron would be promising as "New-Market Disruptive Innovation", and settled on the strategy of making to the business.

Currently, the chemical method using the methyl bromide is the major method for food processing. However, it gives an environmental destruction, and the international treaty determines abolition in the whole world by 2015. The heat-treating method, which is one of the alternative methods, is also pointed out the degradation of the food quality. On the other hand, food processing by irradiation using Cobalt-60 or the electron accelerator is promising as an alternative method. 16 irradiation facilities using Cobalt-60 are operating in the China at present.

The author estimated the irradiation cost by using Cobalt-60 in which the amount of capital investment, the amount of annual irradiation processing, electric power cost, personnel expenses, maintenance cost, a premium, etc. were all taken into account. It was compared with the irradiation cost by using the CW microtron. The author determined the financial strategy based on Discounted Cash Flow method and clarified that the food processing by using the CW microtron served as a promising business with profitability.

Chapter 5

The conclusion of this research is described. In this research, research and development was done by clarifying the technical issue for the general consumer market creation in the accelerator industry, which has played an active part considering science and technology promotion.

Summary

The 500MHz RF system of the high power CW microtron and a practical new system were built. At present, commercialization is being performed for creation of new business in the food processing market.

Summary

目次

要旨	1
第1章 序論	19
1.1 科学技術と加速器の歴史的背景	19
1.2 加速器の社会貢献	20
1.3 産業利用推進上の課題	21
1.4 本研究の目的	22
1.5 論文の構成	22
第2章 電子線加速器の工業的実用化に関する現状	27
2.1 電子線加速器の実用化技術と市場の現状	27
2.2 事業価値のマクロ的考察	36
2.3 電子線加速器の研究開発におけるこれからの方向性と課題	41
第3章 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発	43
3.1 はじめに	43
3.1.1 民生利用加速器における従来技術の課題とその解決策	43
3.1.2 本章の構成	45
3.2 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの基本構成	46
3.3 500MHz RF 加速空洞の高周波特性の検討	50
3.3.1 空洞形状と高周波特性の最適化	50
3.3.2 3次元構造を考慮した2連セル空洞設計	63
3.4 空洞の熱・構造的特性の設計	75
3.4.1 定常運転時の応力歪みに関する検討	75
3.4.2 空洞歪みに伴う共振周波数シフト、応力分布の検討	87
3.4.3 冷却水、大気温度管理	91
3.4.4 真空下での空洞歪み、周波数シフトの検討	93
3.4.5 冷却配管の圧力損失の検討	94
3.4.6 熱・構造設計まとめ	99
3.5 加速空洞の製作	100
3.5.1 全体構造	100
3.5.2 製作の方針	104

目次

3.5.3	空洞の製作	105
3.6	加速空洞の高周波特性試験	108
3.6.1	低電力試験	108
3.6.2	大電力試験	119
3.6.3	加速空洞高周波特性試験まとめ	123
3.7	RFシステムの構築	124
3.7.1	IOT 電源による民生利用向け RF システム	124
3.7.2	チューナシステム	134
3.7.3	全体システム	145
3.8	ビーム加速実験	150
3.8.1	500MHz 電子ビーム発生および入射ラインビーム試験	150
3.8.2	5MeV ビーム加速試験	152
第4章	大出力電子線加速器による食品照射ビジネスの実践	159
4.1	技術および市場の経営学的考察	159
4.2	食品照射とは	164
4.2.1	マクロ的動向	167
4.2.2	各国の取組状況	169
4.2.3	米国での動向	173
4.2.4	欧州での動向	173
4.2.5	アジア諸国での動向	174
4.3	食品照射ビジネスの実践	175
4.3.1	事業コンセプト	175
4.3.2	市場分析	176
4.3.3	事業形態と推進戦略	179
4.3.4	事業の済性評価	184
4.3.5	事業展開戦略	186
第5章	結論	189
	謝辞	193
	参考文献	195
	研究業績	207

目 次

1.1	Livingston 図による加速器技術進歩の変遷	23
1.2	加速器大規模化の変遷	25
1.3	加速器技術の社会貢献	25
2.1	ビームと物質の相互作用における反応の過程	29
2.2	電子線照射の利用分野	29
2.3	静電加速方式の電子線加速器の構成	31
2.4	高周波加速方式の電子線加速器の構成	31
2.5	自己遮蔽型低エネルギー電子加速器	32
2.6	工業利用電子線加速器の設置台数の推移	35
2.7	工業利用電子線加速器の各分野ごとの設置台数推移	35
2.8	ラジアルタイヤ構造	36
2.9	電子線照射処理施設の一例	40
2.10	1990 年の商用電子線加速器におけるエネルギーと出力の関係	42
3.1	大出力 CW 加速器実現の課題とその解決策	44
3.2	5MeV CW マイクロトロン の平面図	49
3.3	5MeV CW マイクロトロン の外観	49
3.4	SPring-8 の 5 連セル 500MHz 加速空洞	51
3.5	SPring-8 の 5 連セル 500MHz 空洞の Superfish モデル	52
3.6	内壁を丸めた形の 500MHz 加速空洞	52
3.7	空洞寸法パラメータ最適手順	54
3.8	加速ギャップ最適化によるギャップと壁損失の関係	55
3.9	1次元加速シミュレーションによる加速エネルギー変化	55
3.10	加速空洞セル長さと壁損失の関係	56
3.11	セル間壁の厚さと壁損失の関係	57
3.12	ビームポートボア径と軸上加速電場分布の相関	59
3.13	壁電流損失とビームボア径の関係	59
3.14	設計した CW 加速器用 2 連セル加速空洞形状	62
3.15	設計した 2 連セル加速空洞中心軸における加速電場分布	62
3.16	空洞構成要素	64
3.17	空洞三次元形状概略図	64
3.18	セル間に設けたカップリングスロットモデル (1/8 カットモデル)	65

図目次

3.19	モード分離とスロット大きさ (MAFIA 結果)	66
3.20	モードにおけるシャント抵抗とスロット大きさ	67
3.21	周波数変化とスロット大きさ	67
3.22	カップリングスロットが電場分布に与える影響	68
3.23	ポートによる周波数ずれ検討:計算は 1/4 モデル	70
3.24	MAFIA で得られた加速モードにおけるポートの発熱分布	70
3.25	カプラポートにおける発熱分布	71
3.26	真空ポートにおける発熱分布	71
3.27	3次元解析および2次元解析で得た電場分布比較	74
3.28	熱・構造解析モデル (1/2 セル空洞モデル)	76
3.29	Superfish による2次元解析モデル	77
3.30	空洞壁損失コンタ図	77
3.31	加速空洞の冷却配管構成	79
3.32	冷却水温度上昇の概略計算	81
3.33	水温上昇計算での空洞の領域分割	82
3.34	空洞 - 物体での温度差 VS 熱流束の関係	83
3.35	各セグメントにおける r、z 方向の歪み量	85
3.36	各セグメント位置	85
3.37	空洞温度分布	86
3.38	空洞周波数シフト計算のフロー	87
3.39	内側冷却配管位置と相当応力最大値の関係	89
3.40	相当応力コンタ図	90
3.41	冷却水温度、および大気温度と空洞周波数シフト変動の関係	92
3.42	真空引き時の空洞表面の大気圧を考慮に入れた空洞計算モデル	93
3.43	径拡大時の圧力損失	96
3.44	径拡大時の圧力損失	96
3.45	並列配管での圧力損失の傾向	97
3.46	加速空洞外形図	102
3.47	CW 加速器装置全体図	102
3.48	空洞チェンバー断面図	103
3.49	カップリングスロット研磨後の空洞リング	105
3.50	ノーズコーン部拡大図	106
3.51	空洞端部リングでの表面粗さ測定	107
3.52	ロウ付け後の空洞	107
3.53	空洞低電力試験測定システム概略図	108
3.54	空洞組み込み前の可動チューナ	109
3.55	空洞低電力試験の様子	109
3.56	カプラ 側のセルでの空洞周波数特性 (f=450MHz ~ 2.45GHz)	111
3.57	真空ポンプ側のセルでの空洞周波数特性 (f=450MHz ~ 2.45GHz)	111
3.58	カプラ 側のセルでの空洞周波数特 (f=450MHz ~ 1.45GHz)	112
3.59	真空ポンプ側のセルでの空洞周波数特性 (f=450MHz ~ 1.45GHz)	112
3.60	空洞 Q 値カーブ拡大図 (横軸 5.5kHz/div、縦軸 0.45dB/div)	113

3.61	アルミ片で作成した摂動子	115
3.62	ビーム軸上および半径水平方向 $\pm 28\text{mm}$ 位置での電場分布測定結果	116
3.63	MAFIA 計算値との比較	117
3.64	マイクロトロンに組込後、同軸管により RF 電源に接続された加速空洞	119
3.65	大電力試験制御システム系統図	120
3.66	大電力試験中の空洞投入電力と真空度の推移	121
3.67	空洞外壁における熱電対配置箇所	122
3.68	通常の 500MHz-RF システム	125
3.69	SR 放射光装置での 500MHz 加速空洞	125
3.70	目標とする RF システム	127
3.71	IOT アンプの原理図概略	127
3.72	最大出力の $1/2$ で反射電力ゼロとなる場合のビーム電流と反射電力の 関係	129
3.73	最大出力時に反射がゼロとなる場合のビーム電流と反射電力の関係	130
3.74	ビーム出力 30kW 時の電子銃出力喪失時の各パワーの変化	131
3.75	位相図：ディチューン状態にして V_c と I_g を同位相とした場合。	132
3.76	導波管 - 同軸管入力カプラ	133
3.77	セラミック窓によるインピーダンス不整合の補正方法	133
3.78	空洞内（左）とチューナハウジング付近での電磁界	136
3.79	MAFIA 解析による電場分布ベクトル図（モード）	138
3.80	チューナ同軸部磁場の分布と減衰係数	138
3.81	設計した周波数チューナの組立図	139
3.82	チューナプランジャ支持棒径と TEM モード周波数の関係	141
3.83	チューナプランジャ位置と TEM モード周波数の関係	141
3.84	チューナ駆動による周波数変調感度	142
3.85	チューナ駆動機構の概略図	143
3.86	モータ必要トルクと出力パルス周波数の関係	144
3.87	システム配置例 I	146
3.88	システム配置例 II（自己遮蔽型）	146
3.89	システム配置例 II-1	147
3.90	システム配置例 II-2	147
3.91	自己遮蔽方式 CW マイクロトロンを用いた照射処理施設概観図	148
3.92	静電型加速器による放射処理施設鳥瞰図	149
3.93	500MHz の電子ビームバンチ波形	150
3.94	カソード - グリッド電圧に対する引出しピーク電流の計算値と測定値	151
3.95	カソード - グリッド電圧に対する引出しビームエミタンスの計算値と測 定値	152
3.96	80keV 電子ビームの RF 加速空洞通過時のビームエンベロープ計算値	153
3.97	周回毎の電子速度の光速に対する割合	155
3.98	偏向電磁石のビーム軌道平面上の磁場分布	155
3.99	計算磁場と実測磁場を使って計算したビーム軌道	156
3.100	蛍光板モニタで観測した 5MeV ビーム	157

目 次

3.101 加速位相とビーム電流の関係 (測定結果)	157
4.1 加速器技術と研究用加速器市場の変遷	160
4.2 加速器技術の異なるバリューネットワークへの展開	161
4.3 がん治療市場と治療技術の変遷	162
4.4 工業利用市場と加工技術の変遷	163
4.5 食品照射市場と食品照射技術変遷の予測	163
4.6 先進諸国における食品由来のサルモネラ症の頻度	168
4.7 わが国における食中毒発生状況	168
4.8 中国農産物輸出量	176
4.9 中国の食品照射施設	178
4.10 中国および世界の食品照射市場規模 (筆者予測)	178
4.11 研究用、医療用および照射用加速器事業における顧客分析	180
4.12 発荷主から受荷主までの流通チェーン概略	180
4.13 バリューチェーンの1プロセスとしての照射事業	180
4.14 5フォースのフレームワークによる外部環境分析	181
4.15 照射ビジネスの事業フロー	184
4.16 照射ビジネスの事業形態	185
4.17 目標事業規模	188

表 目 次

1.1	加速器から生まれたノーベル賞受賞者	24
2.1	1MeV の電子線、 γ 線、陽子線、He イオンビームの水中の透過力	28
2.2	電子線加速器の種類と特徴	30
2.3	ラジアルタイヤの電子線照射処理の特徴	37
2.4	ラジアルタイヤ処理における電子線処理法と従来手法のコスト比較	37
2.5	高圧ケーブル架橋処理法における電子線照射および他手法とのコスト比較	39
2.6	塗料キュアリング処理における電子線照射と従来処理法のコスト比較	39
2.7	医療器具滅菌処理における電子線照射と従来処理法のコスト比較	40
3.1	CW マイクロトロンの主パラメータ	48
3.2	空洞形状とシャント抵抗比較	53
3.3	ビームポートボア径と壁損失の相関 (ギャップ 220mm)	58
3.4	壁損失とボア径寸法の関係 (セル gap=170mm, 内壁曲率半径 $r_3=120$ mm 時)	58
3.5	設計した CW 加速器用 2 連セル加速空洞基本寸法	60
3.6	設計した CW 加速器用 2 連セル加速空洞重要パラメータ	61
3.7	MAFIA 解析で得られた 3 次元形状部による モード周波数補正量	72
3.8	3 次元空洞 モード Q 値解析結果まとめ (1)	73
3.9	3 次元空洞 モード Q 値解析結果まとめ (2)	73
3.10	両空洞の形状パラメータ、壁損失の比較	78
3.11	冷却配管の各種パラメータ	80
3.12	領域分割、従来の計算法を用いた各冷却チャンネル位置での平均温度	81
3.13	解析に用いた境界条件および物性値	84
3.14	周波数シフトの感度係数	88
3.15	各ケースでの空洞の周波数シフト (室温 25 時の空洞形状基準)	91
3.16	季節による室温変動 (5~30) に伴う周波数変動	91
3.17	真空引きによる空洞歪み、共振周波数シフト、および相当応力最大値	93
3.18	径縮小の損失係数	95
3.19	文献 [62] の半経験式と前節の検討結果の比較	98
3.20	空洞圧力損失まとめ	98
3.21	空洞製作設計上の重要な要素	101
3.22	加速空洞の代表的寸法仕様	104

表目次

3.23	試験加工後の表面粗さ	106
3.24	共振周波数測定結果	110
3.25	基本加速モードと高次モード周波数の比較	110
3.26	各セルのチューナ最終挿入量	117
3.27	各ピックアップループ構成後の結合度	118
3.28	空洞温度上昇の測定結果と解析結果比較	122
3.29	設計・製作誤差による周波数誤差とその補正のためのチューナ駆動範囲	135
3.30	周波数変動原因とチューナの必要可動範囲	135
3.31	チューナ寸法まとめ	140
3.32	チューナ移動速度、加速トルク、チューナ必要パルス周波数の関係	144
4.1	研究用途、工業利用、および医療応用で定義した性能尺度	161
4.2	世界の食品照射許可の状況	165
4.3	世界の食品照射許可の状況（続き）	166
4.4	食品照射の実用線量	167
4.5	検疫処理法の比較	169
4.6	照射食品の受容、管理、貿易に関する国際会議の勧告事項	171
4.7	食品照射を実用化している主な国	172
4.8	食品照射事業コンセプトの5W1H	175
4.9	中国の食品照射施設	177
4.10	業実践時考えられる事業形態	179
4.11	CW マイクロトロンによる放射線照射ビジネスにおけるSWOT分析	183
4.12	事業採算性評価における各種前提条件	186
4.13	両プラントでの照射処理単価比較	186
4.14	両プラントでの採算性評価結果	186
4.15	各事業ステージ概略	187

第 1 章

序論

この章では本研究を行った社会的および技術的背景について論じる。加速器科学の発展と現状について概説し、今後の方向性を探ると共に、本研究を行うに至った動機と目的を述べる。

1.1 科学技術と加速器の歴史的背景

加速器は、電子や陽子のような素粒子からヘリウムからウランに至る様々な原子核を、高速に加速する装置である。1930年代に英国の Cockcroft と Walton らにより初めて人工的に粒子を加速した加速器が発明されて以来、原子核の構造の決定、多種類の素粒子・クォークの発見、相互作用の解明のための研究がされ、科学のフロンティアを築き上げた。次々に新粒子が発見されるにつれ、よりミクロな世界の研究のために、「加速器の高エネルギー化」が志向されてきた。現代物理学の発展とともに Livingstone ダイアグラム [1] に示される様、加速エネルギーは 10 年毎に 50 倍の規模での加速器は大型化し、更に図 1.1 に示す様に 2010 年まで増加率は持続すると言われている [2]。

また、近年では高エネルギー化と同様に、加速器の大強度化によって、中間子ビーム、反陽子ビーム、ニュートリノビーム等を用いた新しい研究領域を拓きつつある。代表例としては電子ビームが円形軌道を描く際、放射される「放射光」を利用した物質・生命科学の研究が大強度化のフロンティアによって創り出された。加速器の誕生から現在に至るまでの変遷は図 1.2 に示した様になる。

1. 序論

1.2 加速器の社会貢献

加速器の社会貢献としての一つは、前述の加速器による研究成果そのもので人類への新たなる学術的知見としての貢献である。加速器を用いる事によって、原子核形状の解明、素粒子、クォーク等の発見、相互に働く力の解明等、物質のミクロレベルの構造や現象が戦後急速に明らかになっていった。加速器を用いた基礎科学研究に与えられたノーベル賞の数も表 1-1 に示す通り多数あり受賞者は約 30 人にも上る。[3]。もう一つは、これらの研究成果を築き上げるために開発された技術である。加速器開発で確立された最先端技術は、図 1.3 に示す様に、主にこれまで、原子力、医療、工業への応用が展開されてきた。

原子力分野への加速器利用

加速器はエネルギー、方向性等を制御して、目的に合った様々な放射線を発生させる事ができる特徴を持つ。そこでこれらの最先端技術は、放射線と物質の相互作用を理解することがもっとも基本的な知見である原子力分野へ展開した。

中性子核反応研究に代表される原子核物理、放射線計測技術の研究および機器開発、放射線化学・生体影響研究、原子炉材料に代表される材料開発研究へと多岐にわたる研究が行われてきた。

原子核物理研究成果は、核データと呼ばれ、世界各国の原子力機関でデータベース化されており、わが国では 1960 年より日本原子力研究所が中心となり、JENDL 核データファイルとして集約され、原子炉設計のための基礎データとして使用されてきた [4][5]。更に核融合炉のための設計データとしての整備を進めてきた。

今日では、機能性材料の創生やアイソトープの生成や放射線の生物学的効果の研究が行われている。加速器と原子炉を組み合わせた新たな原子力システム開発では、未臨界炉システムと大電流陽子線加速器を組み合わせた加速器駆動核変換システム (ADS) が原子炉から発生する高レベル放射性廃棄物の消滅処理技術として期待されている [6][7][8]。

医療分野への展開

放射線医学の中でも核医学において、診断および治療の 2 分野を対象に利用がすすんだ。1950 年代には、がん治療に用いられていたコバルト 60 によるガンマ線照射に代わって電子線加速器が使用されるようになった。現在、日本国内では公共病院、個人

病院をあわせて 800 台以上が稼動中である [9]。

一方、診断においては、近年がん診断として注目されている陽電子放出トモグラフィ (PET) に用いる、炭素等の陽電子崩壊短寿命放射性核種用 (RI) 生成のための小型サイクロトロンが全国 60 以上の病院等にて普及している。また Douglas P. Boyd らによって発明された電子線加速器による超高速 CT スキャンは、冠動脈疾患 (Coronary Artery) を正確に発見できる唯一の非侵襲的検査として注目されている [10]。

そして近年の医療用加速器として、粒子線がん治療の開発とその普及への動きである。陽子線と炭素線に代表される重粒子線が用いられており大型の粒子線加速器を用いた粒子線がん治療は粒子線の持つ物理特性から、がん腫瘍部分だけを選択的に線量分布を集中させ、正常細胞の損傷を極力少なくする治療法として注目されており、世界各国で建設計画がすすんでいる。わが国の取組みは、すでに 6 箇所の粒子線治療施設が建設され、世界的にみて他国より数段進んだ体制で推進している [11][12]。

産業技術開発と工業利用

産業界による加速器の工業利用は 1950 年代から始まった。高分子架橋やキュアリングによる電線被覆材やタイヤの材料改質技術等に電子線加速器の利用が開始された。また、半導体産業においては、わが国では 1970 年代から半導体の特性制御技術としてイオン加速器によるイオン注入技術、電子ビームによる露光技術が急速に普及した。

更に、電子ビーム照射による滅菌効果に着目して、医療器具滅菌、排煙、排水、および土壌処理等への実用化研究も行われている。

産業界の研究開発にも加速器は利用されており、創薬応用のためのゲノム研究、次世代集積回路のための放射光リソグラフィ研究、環境保全と結びついた触媒、電池材料の研究、ナノデバイス等の微細加工研究等、多岐の研究分野に跨っている [13][14]。

1.3 産業利用推進上の課題

材料改質、塗料キュアリング等に利用された加速器は keV 領域の低エネルギー加速器が中心で低価格化機種が多かった。しかしその他の応用例に関しては、そのほとんどの施設が比較的規模の大きな施設であった。田中らによると、加速器の産業利用の普及が進んでいない理由として、(1) 放射線源の設備価格が高い、(2) 放射線に対する社会の不安感や恐怖感、等をあげている [15]。

1. 序論

従って、更なる加速器の市場普及には、これらの問題を解決するための技術課題を明確にし、加速器普及拡大へ繋がる技術開発を行っていくことが必要である。

1.4 本研究の目的

本研究では、工業利用等に最も応用実績のある電子線加速器に対し、上記課題を解決するための実用化研究に焦点を絞り、普及型のコンパクトな大出力電子線加速器を考案し、実用化を目指した要素機器研究を行う。筆者は、加速器主要構成機器の一つである RF システムの実用化を目的として、500MHzRF システムの構築のための基礎的研究を行い、マイクロトロンへの適用を実現する。さらに研究後半では、一般消費市場創出を目的とした、食品照射事業実践のための事業化戦略の検討および策定を行う。

1.5 論文の構成

論文は大きく分けて以下より構成される。

1. 電子線加速器の工業的実用化の現状および課題認識（第 2 章）
2. 一般消費市場創出のための大出力電子線加速器の実用化研究（第 3 章）
3. 一般消費市場（食品照射市場）創出のための事業化実践（第 4 章）

第 2 章では、加速器科学の産業界への貢献の中で、電子線加速器の工業利用を採り上げ、実用化技術の現状を分析し、一般消費市場における普及への課題を論じ、普及への課題として大出力化、高効率化、コンパクト化、低コスト化が必要であることを明らかにする。

第 3 章では、前章で指摘した課題解決のため、普及型のコンパクトな大出力電子線加速器“ CW マイクロトロン ”を考案し、加速器の主要構成機器である 500MHzRF システム構築のための研究成果を述べる。

第 4 章では、本研究で開発した大出力電子線加速器 CW マイクロトロンによる一般消費市場創出を目的とした、食品照射事業への展開ターゲットとした事業化実践について論じる。

最後に第 5 章で本研究のまとめについて述べる。

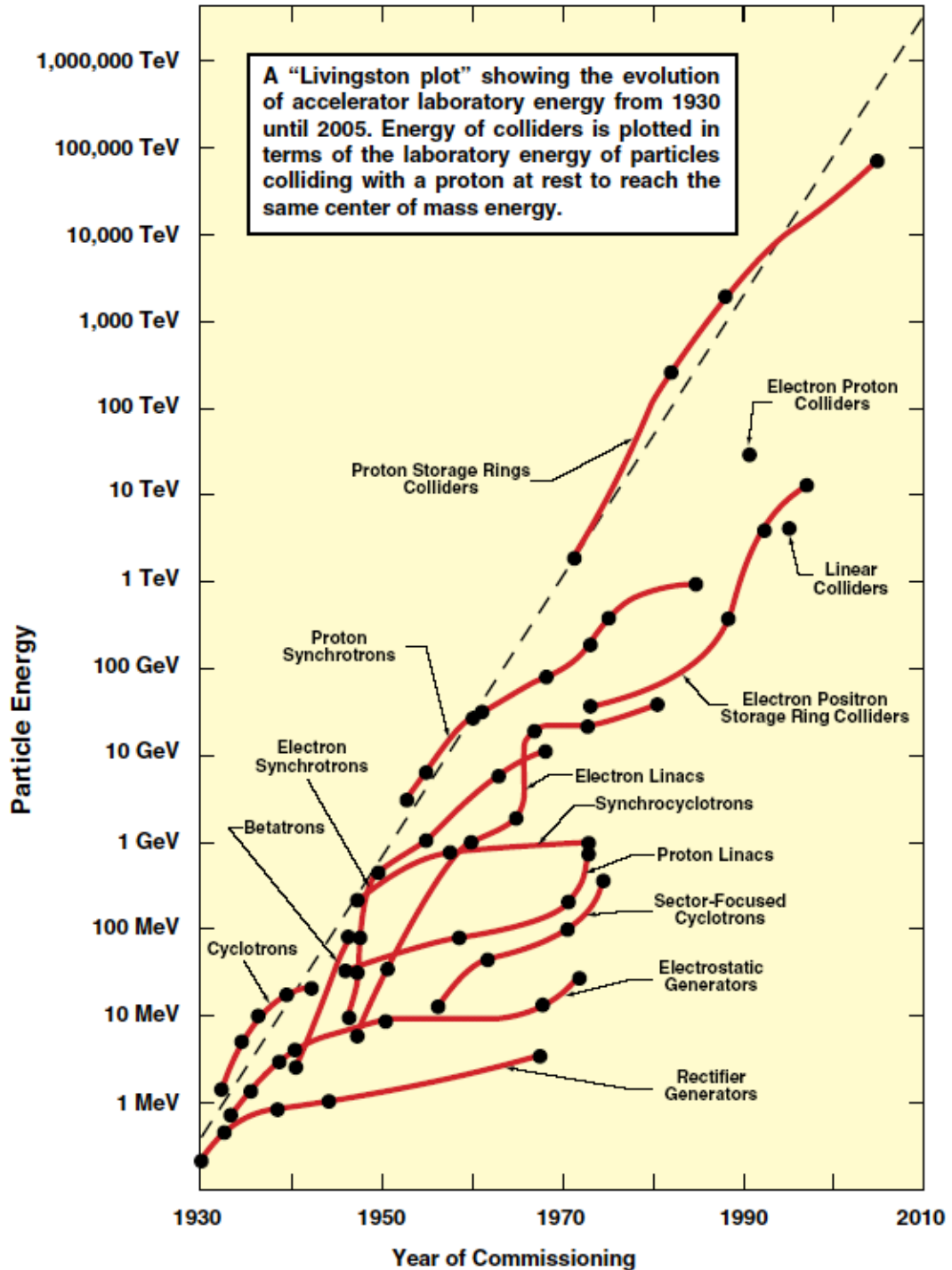


図 1.1: Livingston 図による加速器技術進歩の変遷 ([2] より引用)

1. 序論

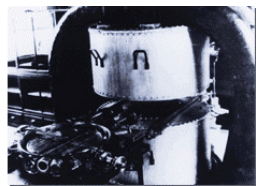
表 1.1: 加速器から生まれたノーベル賞受賞者 ([3] より引用)

受賞年	受賞者	受賞理由	加速器の所在地
1939	E. O. Lawrence	サイクロトロン ¹ の発明と人工放射性元素の研究	カリフォルニア大学 (米) 加速器開発
1951	J. D. Cockcroft E. T. S. Walton	加速荷電粒子による原子核変換	キャベンディッシュ研 (英) 加速器開発
1951	G. T. Seaborg E. M. McMillan	超ウラン元素の発見	カリフォルニア大学 (米) 陽子加速器
1959	E. Segre O. Chamberlain	反陽子の発見	カリフォルニア大学 (米) 陽子加速器
1961	R. Hofstadter	電子散乱による核子の形状	スタンフォード大 (米) 電子加速器
1968	L. W. Alvarez	水素泡箱による多数の素粒子発見	カリフォルニア大学 (米) 陽子加速器
1976	S. C. C. Ting B. Richter	J/ ψ 粒子の発見	ブルックヘブン国立研 (米) 陽子加速器 スタンフォード大 (米) 電子・陽電子衝突器
1980	J. W. Cronin V. L. Fitch	K 中間子崩壊における CP 対称性の破れの発見	ブルックヘブン国立研 (米) 陽電子加速器
1984	C. Rubbia S. van der Meer	弱い相互作用を担う粒子 W と Z の発見	CERN (スイス) 陽子・反陽子衝突器
1988	L. Lederman M. Schwartz J. Steinberger	ミューニュートリノの発見とレプトンの二重構造	ブルックヘブン国立研 (米) 陽子加速器
	J. Deisenhofer R. Huber H. Michel	光合成反応中心の 3 次元構造の解明	DESY 放射光施設 (独) (一部、KEK-PF (日本)) 放射光施設
1990	J. I. Friedman H. W. Kendall R. E. Taylor	電子深部散乱によるクォークの発見	スタンフォード大 (米) 電子加速器
1995	M. L. Perl	タウレプトンの発見	スタンフォード大 (米) 電子加速器
1997	P. D. Boyer J. E. Walker	ATP を分解・合成する酵素の研究	ダレスブリー研 (英) 放射光施設
2003	R. MacKinnon	イオンチャンネルの構造と機構の研究	コーネル大 (米) および ブルックヘブン国立研 (米) 放射光施設

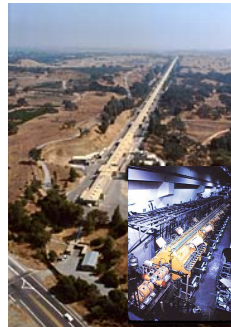
加速器産業黎明から現在

研究用加速器産業の誕生～

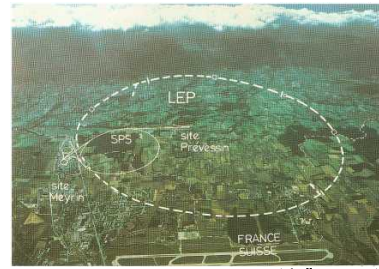
最先端技術の牽引役として科学技術振興を中心に貢献してきた



(出典:理化学研究所)



(出典:Stanford Univ.)



(出典:CERN)

直径1m弱(1937～) 全長3.2km(1990～) 全長27km(2000～)

現代物理学の発展とともに急速に大規模化

図 1.2: 加速器大規模化の変遷

加速器の社会貢献

最先端技術 → 原子力、医療、産業技術、工業利用 → 貢献

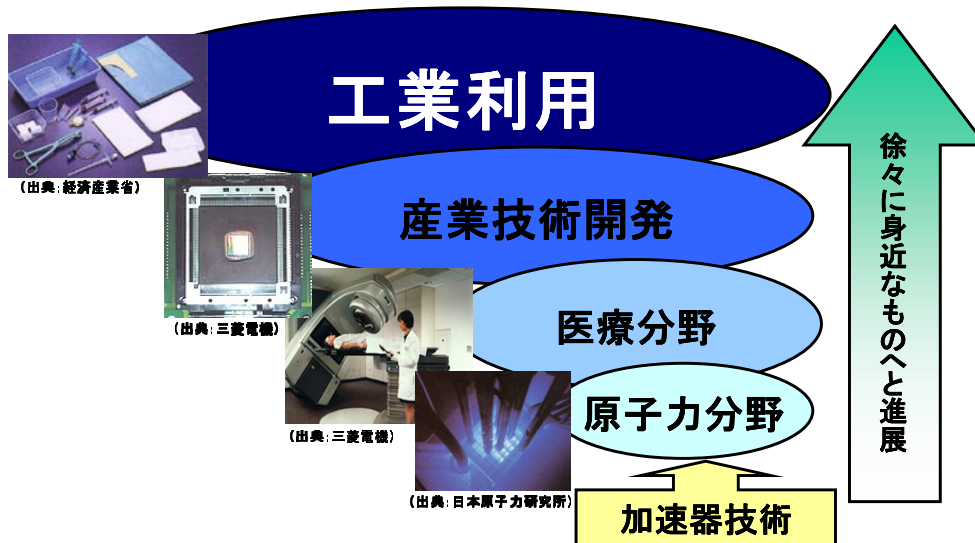


図 1.3: 加速器技術の社会貢献

1. 序論

第 2 章

電子線加速器の工業的実用化に関する 現状

本章では粒子線加速器の社会貢献の中でも、電子線加速器の工業利用における、実用化技術の現状について主な用途に分類し、各用途における放射線利用による経済的効果を分析し、放射線利用の有用性を明らかにする。次に、民生市場に代表される、更なる市場普及のための技術的課題を分析し、一般消費市場創出のための研究開発の方向性を明確にする。

2.1 電子線加速器の実用化技術と市場の現状

電子ビームは物質内に入ると物質との相互作用でエネルギーを失い、ある地点で停止し、このとき表面から停止までの距離を飛程と呼んでおり、ビームの投下力の目安となる。ビームが失ったエネルギーは物質に与えられる。このビーム飛程あたりのエネルギー付与の割合を阻止能、あるいは線エネルギー付与 (LET) と呼び、エネルギー付与の密度を示す。表 2.1 に 1 MeV の電子線、および γ 線、陽子線、He イオンビーム等の水中の透過力をまとめた。同じ 1 MeV を電子線では 5mm 失うのに対し、He イオンではミクロンオーダーである。このようにエネルギー付与密度はビームの種類に大きく依存し、その結果として、ビームの引き起こす効果に差が出る。図 2.1 にビームと物質の相互作用における反応の過程を示す。反応の初期課程において物質のイオン化、励起、原子のたたき出し反応等が生ずる。これによって物理的、化学的反応が発生し、水の分解、高分子切断、架橋等の分子間化学結合の形成、格子欠陥の形成などによっ

2. 電子線加速器の工業的実用化に関する現状

表 2.1: 1MeV の電子線、 γ 線、陽子線、He イオンビームの水中の透過力

ビームの種類	水中での透過力
ガンマ線	10cm で半減
電子線	0.5cm
陽子線	3 μ m
He イオン (アルファ線)	0.5 μ m

て様々な物理的、化学的効果を引き起こす。一方、これに伴い、生体中においては細胞の殺傷や増殖抑制等の生物的变化が現れる。結果として微生物の死滅、害虫の不妊化、突然変異なども引き起こす。電子線利用においてはこれらの物理、化学および生物的效果の実用化が最も進んでいる。

放射線処理加工技術は 1952 年、英国の A. Charlesby によるポリエチレン架橋の発見以来徐々に範囲を広げ、取扱いに容易な電子線発生装置の向上とともに、工業利用分野で著しく発展した [16]。架橋、グラフト重合、ゴム加硫に加え、環境保全、滅菌・殺菌分野も加え利用分野を拡大し、国内における放射線利用全体の経済規模は製品売上高で表すと 7 兆 3 千億円 (1997 年度) にも及ぶとされている [17][18]。尚、医療、産業等の分野別での詳細な調査結果は田川ら [19][20][21][22] によって報告されているので参考にされたい。これらの拡大に伴い工業利用される電子線加速器も設置台数が増加し、利用分野に応じた性能機種も増えた。図 2.2 に電子照射の利用分野を示す通り、様々な分野で利用されてきた。

電子線照射で用いる電子加速器は、高真空中で電子銃から電子を発生し、方向を揃えて加速管に打ち込み、管内の電場により加速して高速の電子線を発生する放射線発生装置である。原理的には、真空管や TV のブラウン管、X 線管と同じである。出力する電子線のエネルギーにより、数百 keV から 5MeV の範囲ではコッククロフト・ワルトン型や変圧器型のような直流高圧電場を用いた静電加速方式が、また、5~10MeV の範囲では直線加速装置 (ライナック) のように高周波電場を用いる高周波加速方式がよく用いられる。加速された電子線は交流磁界によりスキャンした後、薄い金属箔で造られた照射窓を通して大気中に取り出し照射に利用する。電子線出力が数十 W から数百 kW の装置が実用化されている。

2.1 電子線加速器の実用化技術と市場の現状

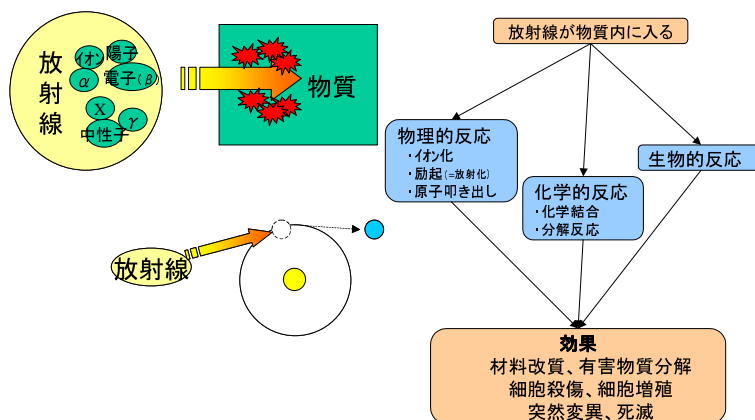


図 2.1: ビームと物質の相互作用における反応の過程

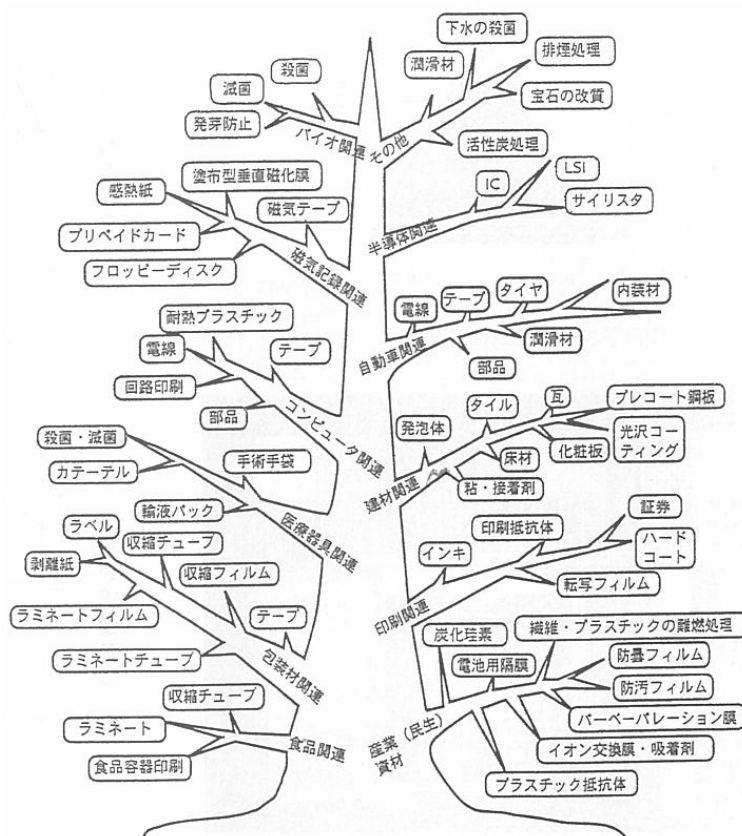


図 2.2: 電子線照射の利用分野 (原論文 [23] より引用)

2. 電子線加速器の工業的実用化に関する現状

図 2.3,2.4 に静電および高周波加速方式の工業用電子線加速器構成の一例を示す。静電加速方式の場合、加速器本体は直流高電圧を発生するための電源部、電子を発生させる電子銃、電子を加速するための加速管、加速された電子を照射幅に合わせて走査し大気中に放出させるためのスキャンホーン、真空保持のための真空装置、および装置全体を制御するための制御装置で構成される。電子銃と加速管は圧力容器に収納し SF₆ 等の絶縁ガスを充填する。電源装置は、コッククロフト・ワルトン型等の直流電源が用いられる。電子ビームを走査しながら出力するスキャンホーンは、通常、加速器室と隔離した照射室に配置する。照射室及び加速器室は発生する放射線を遮蔽する構造である。一方、高周波加速方式の場合は、高周波電源部は直流高電圧部、パルス発振のためのモジュレータ、マイクロ波（高周波）を発生させるクライストロンによって構成され、電子銃からの電子発生タイミングを制御する制御装置が加わる。更に投入したマイクロ波を吸収するダミーロードが必要となり、進行波加速管の場合は加速管終端にダミーロードが必要になり、定在波型線形加速器の場合、マイクロ波を投入する伝送路中にサーキュレータとダミーロードを配置し反射波を吸収する。

両方式の特徴を表 2.2 に示す。直流加速方式は電子ビームの加速エネルギー分の直流高電圧で加速する方式で、連続ビームが発生でき、エネルギー変換効率（入力電力に対するビーム出力電力の比）が高い。しかし加速エネルギー相当の直流高電圧を発生するための装置サイズは加速エネルギーに伴い増大し、実用性の観点から使用範囲は 5MeV 以下となっている。高周波加速方式では高周波電界を用いて加速する方式で、放電限界の特性から、より高電圧を加速管に印加する事が可能となり装置サイズは小さくなる。しかし電子線の加速に利用できる位相範囲が限られるためエネルギー変換効率は低いといった特徴を有する。

表 2.2: 電子線加速器の種類と特徴

種類	定格範囲	特徴
静電加速方式	5MeV 以下	(1) エネルギー変換効率が高い (2) 装置サイズが加速エネルギーと共に増加
高周波加速方式	主として 10MeV 以下	(1) 装置サイズが比較的小さい (2) エネルギー変換効率は低い

2.1 電子線加速器の実用化技術と市場の現状

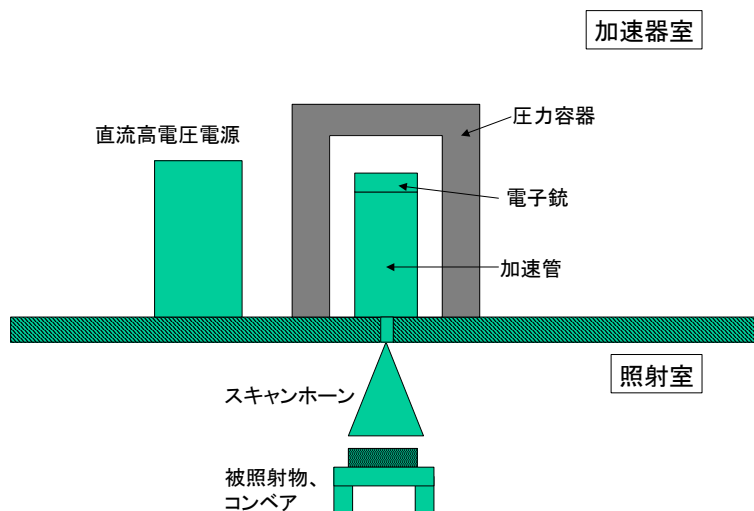


図 2.3: 静電加速方式の電子線加速器の構成 (文献 [24] に加筆)

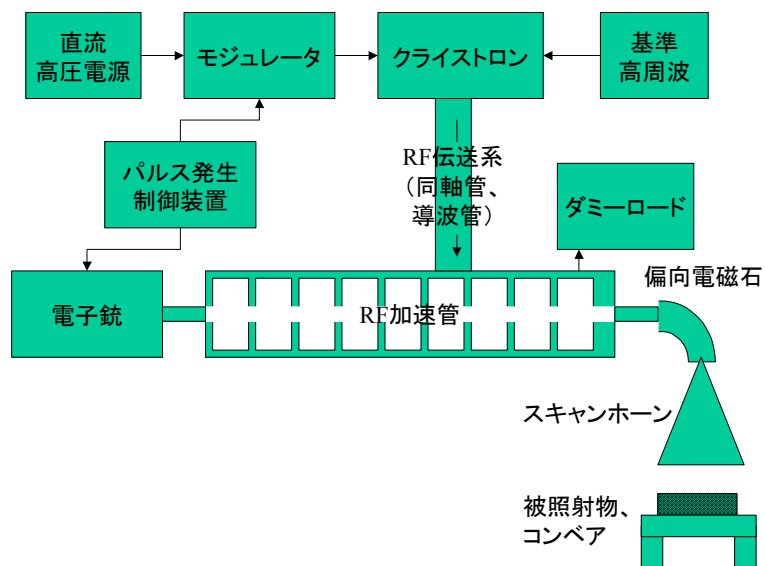


図 2.4: 高周波加速方式の電子線加速器の構成 (文献 [25] に加筆)

2. 電子線加速器の工業的実用化に関する現状

図 2.5 に、実用化されている電子線加速器について、自己遮蔽型電子線加速器を例に示す。一般に放射線発生装置における重大な放射線障害は、運転中に人が誤って照射装置近傍に侵入することによる放射線被曝等があるが、電子加速器の場合、出力を ON-OFF 制御できるので、被曝リスクはコバルト等に代表される放射性同位元素による照射装置と比べ、大きく軽減される。更に自己遮蔽型装置の場合においては、全体が鉛板等で遮蔽されているので、運転中に係らず特別な遮蔽設備は必要とせず上記放射線障害は防ぐことが可能となる。

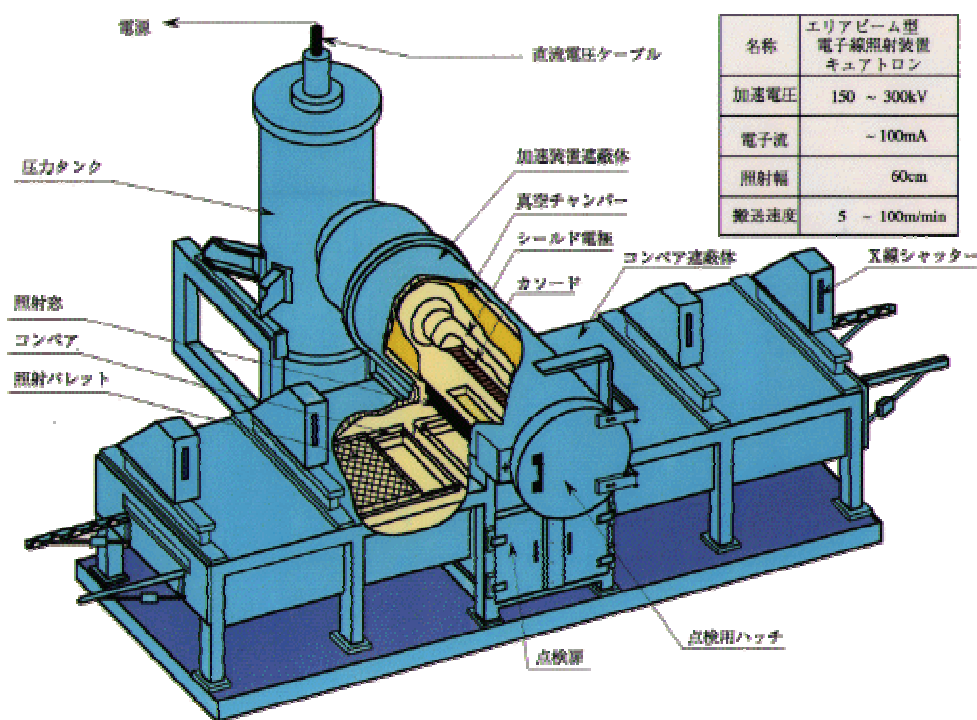


図 2.5: 自己遮蔽型低エネルギー電子加速器 (原論文 [24] より引用)

2.1 電子線加速器の実用化技術と市場の現状

以下、工業用電子線加速器の代表的利用分野を記述する。

1. 架橋分野

架橋は分子間を3次元構造で結合し、耐熱性向上等の高分子物性を改善するものである。従来の硫黄を添加して加熱する方法に対し、放射線架橋は、高分子への放射線照射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。この技術は早くから耐熱被覆電線、耐熱シート・フィルム、熱収縮チューブ等の製造に利用され、工業利用分野として最も成功した例であり、電気機器の配線等に広く使用されている。発砲ポリエチレン等の発泡材も実用化された。電子線による架橋法は従来の科学架橋法に比べると、①架橋と発泡の個別制御が可能、②良好な衝撃吸収性、③表面平滑性が良い等の利点がある。電子線照射装置としては500kV～3MV、電流50～100mAの装置が利用されている。

2. タイヤ分野

従来のタイヤ製造は複数の異なる成分で構成されるゴムを重ね合せて形成した後、加硫工程を経て製造される。1970年代から米国を中心に電子線照射による予備加硫工程に利用され始めた。その後、主に日本で研究開発がすすみ、世界をリードする形で実用化がすすんだ。300～800keVの装置が利用される。

3. グラフト重合分野

幹となるポリマー鎖に異なるモノマーを接ぎ木状に重合させて幹ポリマーに枝ポリマーの性質を付加させるポリマーの改質技術として利用されている。イオン交換樹脂膜、電池のセパレータ、吸水性ポリマー、防曇フィルム等の高機能付加材料の製造に利用されている。300kV以下の低エネルギー電子線照射装置が利用される。

4. ラジカル重合分野

1960年代にラジカル重合反応を利用した塗料塗膜の瞬間硬化が注目され、塗料メーカー数社にパイロットプラントが設置され、自動車部品や、金属板、合板塗装に利用された。この分野ではUV法が主流であるが、電子線照射の特徴を活かす分野も現れ、リリース紙、凹版印刷、粘着剤、転写フィルム等の製造で利用拡大しつつある。

2. 電子線加速器の工業的実用化に関する現状

5. 排煙、排水処理利用

排煙からの脱硫、脱硝装置として電子線照射処理が注目され、1970年ごろから研究が盛んになった。国内では中部電力での実験プラント、自動車道トンネル内の排ガス処理プラントが、海外では中国四川省にある成都の石炭火力発電プラントや、ポーランド石炭火力発電所等で実用装置が稼働している [26][27][28]。その他にも下水、廃水処理、排気中の有機塩素化合物、ダイオキシン、PCB 処理等幅広く研究され、最近では液体から重金属をキレート状で除去する方法で、50kGy で95%以上除去できることが報告されている。800kV、電流値 400 ~ 500mA の大出力装置が使用される [29]。

6. 殺菌・滅菌分野

放射線による殺菌・滅菌は、医療器具等の殺菌がコバルトからの γ 線をを用いて広く行われていた。一方、エチレンオキサイドガス等の有毒ガス利用が安全管理、環境保全の立場から電子照射法へと代替する傾向にある。国内にも自社専用や、委託滅菌設備が稼働している。5MeV 照射装置は X 線変換窓を装着した X 線照射を行い、10MeV 照射装置では電子線照射によるものである [30]。

以上の利用分野拡大により電子線加速器の国内設置台数は、図 2.6 に示すように増加してきた。図 2.7 にはその分野ごとの推移を示す。

加速器の性能は、環境保全では大電流化と高効率化、キュアリング分野では低エネルギー化と長幅化、殺菌・滅菌分野では高エネルギー大出力化等、利用分野に応じて異なる性能が要求される。

2.1 電子線加速器の実用化技術と市場の現状

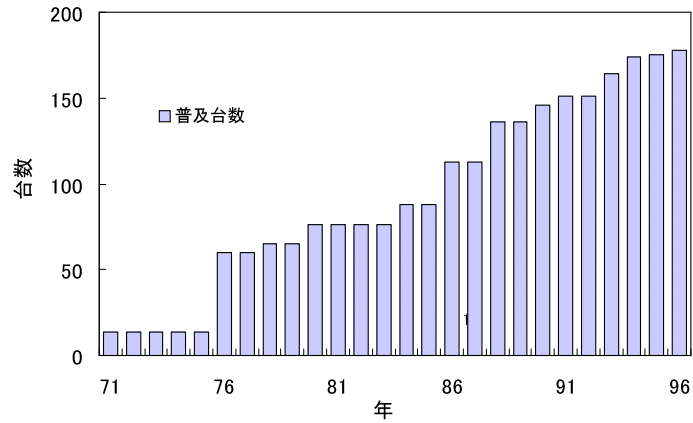


図 2.6: 工業利用電子線加速器の設置台数の推移 (原論文 [31] より引用)

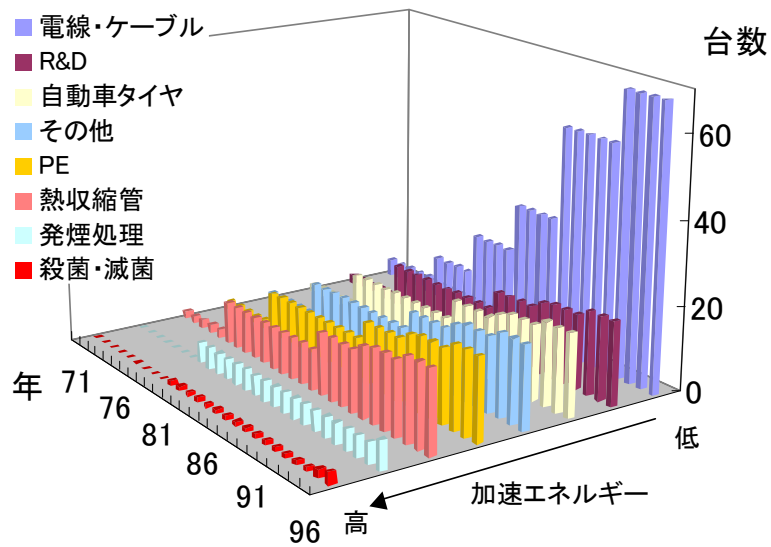


図 2.7: 工業利用電子線加速器の各分野ごとの設置台数推移 (原論文 [31] より引用)

2. 電子線加速器の工業的実用化に関する現状

2.2 事業価値のマクロ的考察

電子線照射による技術的信頼性、経済性、小型化、容易な運転保守、安全性、環境保護等の優れた性質によって、電子加速器の工業利用は、近年、目覚ましく発展してきた。経済性、生産性は実用化技術としては特に重要な項目である。ここでは、経済的観点から、電線照射の持つ優位性を、自動車タイヤ架橋、高圧ケーブル架橋、塗料キュアリング、医療器具の滅菌を例にあげ分析する。尚、評価指針は、土井の報告 [32] を参考に現在のレートに換算し評価した。

自動車タイヤ架橋

80 %以上のラジアルタイヤは電子線照射処理がなされている。ラジアルタイヤの構造を図 2.8 に示す。また電子線照射によって各構成部に得られるメリットは表 2.3 に通りである。電子線照射処理の概略を図 2.9 に示す。

電子加速器のエネルギー 1.5MeV、電流 50mA、吸収線量 100kGy の照射設備について、単位生産量当たりの製造費を設備の原価償却を含めて試算した。運転時間 6000 時間/年、償却期間 10 年、労働賃金 800 円/時間、電力費 15 円/kWhr の前提条件で比較を行った。表 2.4 に電子線処理法と従来法との比較結果を示す。

従来法であるロートキュア法に比べて、電子線法の製造費は 1/6 であり、電力費用も 1/6 となり、非常に経済的であると言える。他の文献でも、電子線法の製造費は従来法の 1/9 ~ 1/2 であることが示されている。以上より電子線処理法が他の処理法と比較して、生産性、経済性において非常に優位であることが示された。

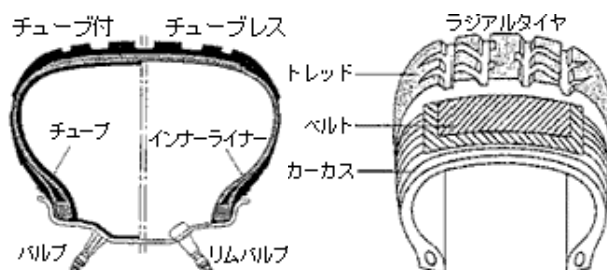


図 2.8: ラジアルタイヤ構造 ([33] より引用)

2.2 事業価値のマクロ的考察

表 2.3: ラジアルタイヤの電子線照射処理の特徴

部品	体積の削減	製造法の向上	質の向上
インナーライナー			
カーカス			
サイドウォール			
ベルト		-	-
トレッド	-	-	
ビード	-	-	
ラバーチューブ			

表 2.4: ラジアルタイヤ処理における電子線処理法と従来手法のコスト比較

Item	電子線処理法	ロートキュア法
資本コスト	¥ 68,200,000	¥ 64,350,000
運転コスト		
減価償却 (10 年)	¥ 6,820,000	¥ 6,435,000
労務費	¥ 4,800,000	¥ 4,800,000
ユーティリティ費	¥ 21,600,000	¥ 19,800,000
保守費	¥ 1,980,000	¥ 660,000
間接費	¥ 4,800,000	¥ 4,800,000
合計	¥ 40,000,000	¥ 36,495,000
単位時間コスト (¥ /hr)	¥ 6,667	¥ 6,083
製造コスト (¥ /kg)	¥ 4.44	¥ 24.33
電力費 (¥ /kg)	¥ 2.40	¥ 13.20

2. 電子線加速器の工業的実用化に関する現状

高圧ケーブル架橋

高圧ケーブルにおける電子線照射架橋技術は普及が進んでおり、1000kW 級の加速器が国内には 20～30 台程度稼働している。これらは薄ケーブル用である。6600V 用 22 mm² CV 高圧ケーブルを加速エネルギー 1.5MeV、25mA、250kGy で照射する場合を、3 種類の従来法とを電力 15 円/kWh、蒸気消費量 6800 円/トン (650kg/hr) のもとで比較した。電子線照射および他手法とのコスト比較結果を表 2.5 に示す。電子線法の製造費は従来法の 1/20～1/9 となり、顕著な経済的優位性を示すことが判る。

塗料キュアリング

電子線照射は熱処理手法と比べ、処理時間の大幅な短縮 (最大 1/50 短縮)、施設規模の簡略化、エネルギー効率等 (最大 12 倍程度) で顕著な優位性を示す。ここでは、ベニヤ板 (90cmx180cm) 加工工程におけるラジカルグラフティングのハイポリマー塗料を 220kGy で照射する場合について、プラント規模 4000 枚/日、稼働率 250 日/年、電力費 15 円/kWhr、労務費 800 円/hr、ユーティリティ容量 20kVA とした。表 2.6 に示すとおり電子線照射により処理コストは 1/3 弱まで低減することが出来る。

2.2 事業価値のマクロ的考察

表 2.5: 高圧ケーブル架橋処理法における電子線照射および他手法とのコスト比較

処理法	電子線照射	蒸気	SF6 ガス	シラン架橋
処理コスト (¥/kg)	¥2	¥32	¥43	¥20

表 2.6: 塗料キュアリング処理における電子線照射と従来処理法のコスト比較

	処理法	電子線照射	熱処理
設備投資	加速器装置一式	¥ 28,500,000	-
	放射線シールド	¥ 2,850,000	-
	乾燥炉	-	¥ 25,000,000
	建屋	-	¥ 6,000,000
	合計	¥ 31,350,000	¥ 25,000,000
運転コスト	償却費	¥ 3,135,000	¥ 2,500,000
	触媒、蒸気コスト	-	¥ 7,920,000
	電力コスト	¥ 600,000	-
	労務費	¥ 1,600,000	¥ 3,200,000
	保守費	-	¥ 620,000
	処理コスト (¥/枚)	¥ 5.34	¥ 14.24

2. 電子線加速器の工業的実用化に関する現状

医療器具滅菌

従来行われていたエチレンオキサイドによる滅菌は、近年、生物および環境に対して有害であることが指摘され、その姿は消えつつある。ここでは、電子線法とガンマ線法の経済性を比較した。電子線照射処理においては被照射物は、図 2.9 に示すように、照射室を貫通するコンベアにより内部へ搬入され、電子ビーム照射を受けた後、コンベアで搬出される連続処理方式となる。ここでは、電子線加速器は 5MeV-3mA とし、ガンマ線源は 3.7×10^{16} Bq のコバルト-60 を用い、吸収線量を 30kGy として試算した。電子線法の処理コストはガンマ線法の 1/4 ~ 1/5 となり、経済的な優位性を示す。

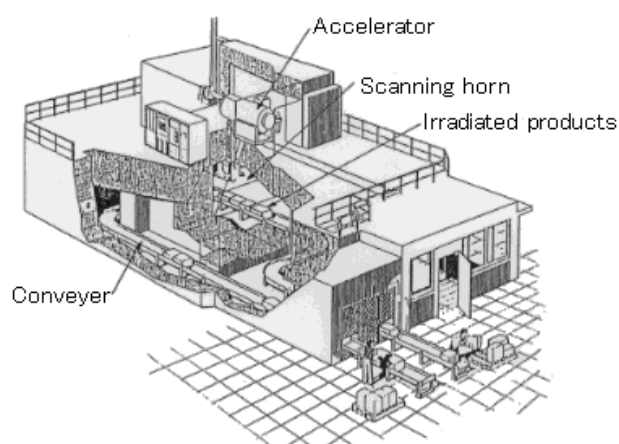


図 2.9: 電子線照射処理施設の一例（原論文 [34] より引用）

表 2.7: 医療器具滅菌処理における電子線照射と従来処理法のコスト比較（[32] に加筆）

処理法	電子線処理	Co-60 ガンマ線処理
設備コスト	¥ 800,000,000	¥ 1,600,000,000
運転コスト		
償却費	¥ 80,000,000	¥ 160,000,000
保守費	¥ 15,000,000	¥ 3,000,000
線源コスト	-	¥ 150,000,000
ユーティリティ	¥ 8,450,000	-
労務費	¥ 20,000,000	¥ 15,000,000
合計	¥ 123,450,000	¥ 328,000,000
処理コスト (m ³)	¥ 1,150	¥ 5,050

2.3 電子線加速器の研究開発におけるこれからの方向性と課題

前述の電子線加速器の国内普及台数を示した図 2.7 を見ると、滅菌が用途である加速器に関して市場成長が十分に進展していない事が確認できる。ここでは主に 5MeV 以上の高エネルギー電子線加速器が用いられる領域である。表 2.2 に示した加速器の種類と特性によると、静電加速方式では電流値が大きく高出力が得られるが、実用性を維持しつつ加速電圧を 5MV 以上にするためには技術的課題がある。一方、高周波加速方式では線型加速器は 10MeV 以上の高エネルギー電子を容易に発生できる。しかし、電流を大きくするのは容易では無く、例えば、大出力化による温度上昇によって、加速管寸法が変化し、高精度で作られた加速管は加速条件を維持する事が出来なくなる。また、加速管を長くし、単位長さ当りの加速電圧を下げれば、単位長さ当りの発生熱量は低下するが、ビーム負荷効果や不安定性の問題が発生し、実用性を失う。また電力効率の観点からも、上記問題から、デューティ 1/1000 程度のパルス運転を行っており、電力効率改善の余地がある。

R. Morrison らによると、1990 年までの実用化された電子線加速器は図 2.10 に示した状況となっている [34]。その後、新しいタイプの加速器が各研究機関で開発され、[35][36][37] 等が報告されている。その中でも Rhodotron は既に商用利用機として実用化され 10MeV-200kW のスペックを実現している [38]。しかしながら一方でコスト的には [39] で示されている通り、従来の同エネルギーの加速器と比較すると高額なものとなり、普及推進のためには大幅なコストダウンが必要となると考えられる。

一方、加速エネルギー 5MeV で普及が進んできた静電型加速器においても、高さ数 m 程度にもなり非常に大型となり、建屋設備は大掛かりなものとなり、普及型として扱うには実用性に欠ける [40][41]。

従って、現状ではコンパクトで電力効率の高い普及型電子加速器が無く、これらの分野での産業利用の立ち上がりが遅れており、これらの開発のための基礎研究の遂行が急務であると考えられる。

このような背景から、筆者らは、普及推進を目的として大出力、高効率、コンパクトの 3 要素の開発目標を設定し、大出力電子線加速器“ CW マイクロトロン ”の基礎研究を開始した。

2. 電子線加速器の工業的実用化に関する現状

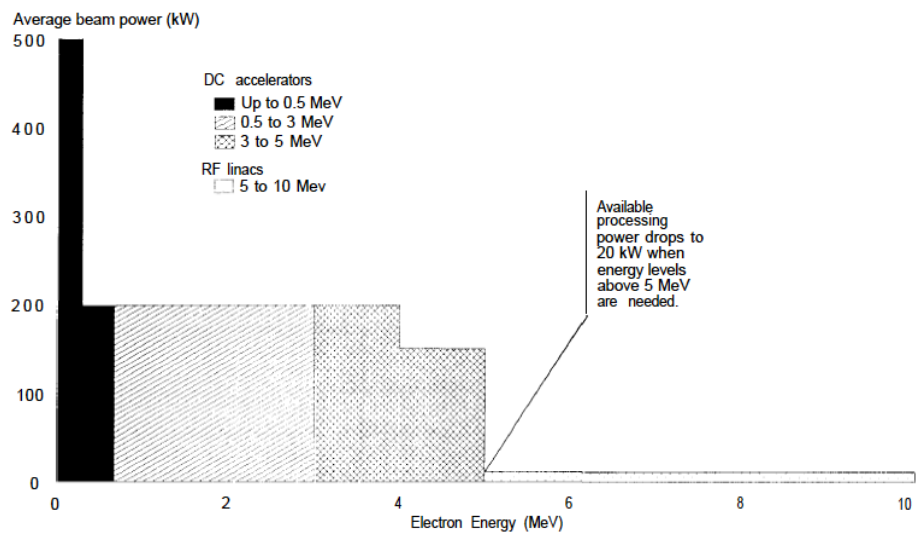


図 2.10: 1990 年の商用電子線加速器におけるエネルギーと出力の関係 ([34] より引用)

第 3 章

大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

3.1 はじめに

電子線加速器開発の今後の方向性が前章で明らかになった。筆者らは電子ビーム実用化システム構築のため、大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの研究開発を開始した。本節では、先ず従来型加速器の技術課題と解決策を述べ、本章の構成を説明する。

3.1.1 民生利用加速器における従来技術の課題とその解決策

前章で説明した通り民生利用加速器としては、大出力、高電力効率、コンパクトの 3 点を満足する必要がある。CW マイクロトロンで取入れる、上記 3 つの課題に対する解決策を図 3.1 に示す。大出力化するためには、従来マイクロトロンの高周波加速で用いられている S-band 帯（約 2.8GHz）では、大出力化の際、加速空洞等の発熱の問題から、使用 RF 周波数帯域を下げる必要がある。RF 周波数を下げると、空洞の寸法が大きくなり、発熱密度の低減が可能となる。同時に熱の除去も大面積での冷却が可能となる。しかしながら RF 周波数を下げると同時に加速器全体の寸法が大きくなりコンパクト性の要求には逆行する。よって大出力とコンパクト性の 2 つの観点から、出力毎に適切な RF 周波数帯が決まると考える。この際、使用する RF 電源も RF 周波数選定の重要な要素である。250MHz 程度以下の周波数では電子管（4 極管）が、それ以上の周波数ではクライストロンの使用となる。さらに 470 ~ 860MHz 付近では、放送基地局で用いられる IOT(Inductive Output Tube) 電源を用いる事が出来る。IOT は高電

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

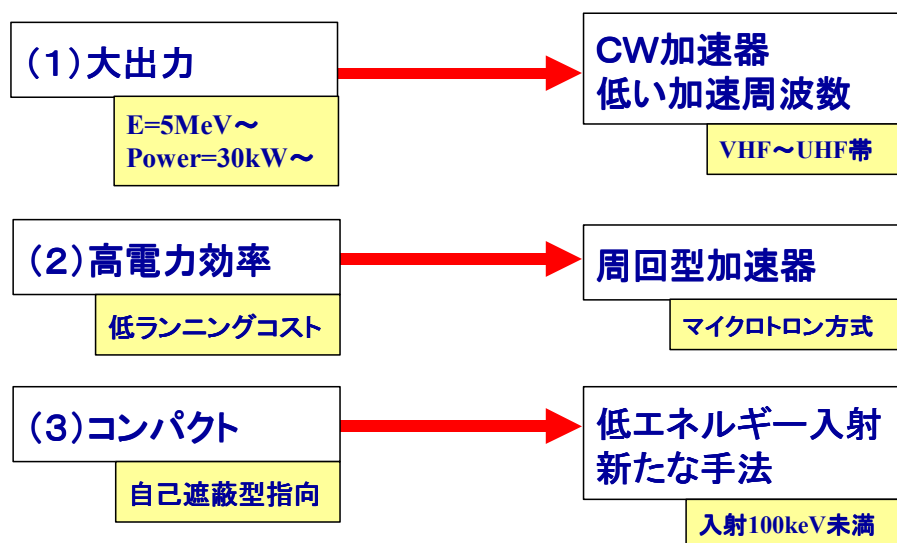


図 3.1: 大出力 CW 加速器実現の課題とその解決策

力効率で、プラグインによる管の交換等、保守が簡便であり民生用途には魅力的である [42]。高電力効率化は、ランニングコストを下げるために必須の項目である。CW 加速器は空洞に連続の高周波電源を投入する必要があるので、周回型の加速方式とし、空洞長さを出来るだけ短くし低消費電力化を図る必要である。また、空洞通過の回数も出来るだけ増やす必要がある。

コンパクト化は普及させる上では重要な要求項目である。また、放射線遮蔽という観点では自己遮蔽型化につながる所以に特に重要である。コンパクト性を達成するには低エネルギー入射が必須条件である。入射エネルギーが高くなると、大規模な入射器を要する構成となり民生利用装置としては適合しない。例えば、原子核研究用として世界に数台存在する S-band の CW マイクロトロン [43][44][45] では、入射エネルギーは 2~5MeV であり、入射用の加速器が別に付属する形態となり民生利用装置としては適合しない。一方、低エネルギー入射の加速器では、加速とともに速度が変化する点や空間電荷効果を考慮することが不可欠である。

このような状況下で、筆者らはコンパクトな普及型大出力電子線加速器 CW マイクロトロンを考案し、その研究開発を行った。本論文はこれらの開発のうち、RF システムの実用化研究についてを詳述する。

3.1.2 本章の構成

各節の内容は以下の通りである。

- 第 3.2 節では、CW マイクロトロンを構成する電磁石、電子銃、RF 加速空洞等の各サブシステムの基本構成およびその特徴を説明する。
- 第 3.3、3.4 節では 500MHz 加速空洞を CW マイクロトロンへ適用するための高周波特性及び熱・構造的強度の設計検討を行い本加速空洞の設計指針を確立する。
- 第 3.5、3.6 節ではモデル空洞を製作せず、直接実機使用する加速空洞を製作し、低電力試験によって空洞の高周波特性を実測し、設計での検討結果と比較検証する。また大電力試験を行い 40kW の電力供給に何等問題ないことを示し、また熱特性、RF 特性が設計での計算値とよく一致することから加速空洞の設計、制作方法に何等問題ないことを述べる。
- 第 3.7 節では RF システム全体の検討を行い、CW マイクロトロンで採用した RF 電源、伝送線路、カプラに詳述し、加速空洞の周波数制御チューナの設計、制作方法を詳しく述べる。更に民生利用を主目的とした加速器システム全体の構成について述べる。
- 第 3.8 節ではビーム試験結果を述べ、加速器システムとしての稼動状況を述べる。

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

3.2 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの基本構成

図 3.2 に 5MeV 機の CW マイクロトロンの概略構成図を示す。全体寸法は 3.9m × 1.6m × 1.1m である。小型で自己遮蔽が比較的容易なレーストラック型マイクロロンタイプの大出力加速器である。

大出力化のためには CW(Continuous Wave) 運転が必要となるが、従来の S-band 加速空洞を用いたレーストラック型マイクロロンでは、前述の通り、加速空洞の熱的問題等から CW 運転は困難であった。一方、熱的問題を避けるために加速ゲインを下げると、周回毎の電子速度変化のためにマイクロロン加速条件を満たさなくなると言う問題が生じる [46]。筆者等は、加速空洞を CW 運転時の上記問題及び全体の大きさを考慮して 500 MHz-2 セル空洞を採用した。また、偏向磁場を 2 分割して加速位相調整する新しい方式 [47] や、長寿命化を目的とした 500MHz にパルス化したビーム取出しを行う電子銃の開発 [48] を行った。以下、主要構成機器の特徴を述べる。

1. 電子銃

長寿命化を目的に、500 MHz にパルス化したビームを取り出せる方式を開発した。加速器用電子銃で 500MHz の RF で引き出している前例はなく、今回初めて可能とした。80keV のパルスビームを入射する際、電子銃のグリッドのドライブを高周波で行う必要があるため、グリッドカソードを同軸構造にしたグリッド・カソードアセンブリをそのまま利用する方式を考案した。

2. 入射系

集束はソレノイドコイルで行う。グリッド駆動電圧が高く、エネルギー分散が大きくなる場合には、入射ラインは 1 回偏向電磁石で曲げ、無分散系を構築する。なお、入射ビームのマッチングの精度を良くする必要がある場合には、入射ラインに小さなダブレットの QM を配置する。入射はシケイン電磁石を構成して行う。3 つの偏向電磁石を直列に並べ、入射ビームは 3 つめの偏向電磁石で入射する。加速ビームはシケイン軌道を作り、入射ビームと重なることはない。入射角度は 45 度とする。

3. RF 加速空洞

3.2 大出力電子線加速器 CW マイクロトロン の基本構成

500MHz タイプの RF 空洞を用いる。RF 空洞は 2 セルで構成され、500kV/1cell 程度の電圧を印加する。電子ビームを 6 回加速空洞に通過させ、5MeV まで加速する。1 回通過したビームは、加速空洞の外側を通過できないので、再度同じ軌道に戻し、逆方向から加速空洞を通過させる構成とする。その為に偏向電磁石出口には逆磁場発生用の偏向電磁石を配置する。全ての偏向を同一の偏向電磁石で行う構成とする。加速空洞の配置位置は、1 回目の通過と 2 回目の通過の加速位相が最適となる位置に配置する。その場合、光速との相違が支配的であり、上記を考慮した検討が不可欠である。加速空洞を 2 回通過した後は、加速空洞の外側を通過可能であり、3 回目以降は 2 回目と同方向で加速空洞を通過する。

500MHz タイプの加速空洞としては、既に放射光 (SR) 装置の加速空洞として高エネルギー加速器研究機構等で開発されている [49][50]。しかしながら、これらは主として加速に有効な電界以外の高調波成分を小さくする方針で設計されている。一方、CW マイクロトロンでは民生利用を想定した加速器であり、電力コスト低減のための高電力効率の加速空洞を開発するという方針で設計した。

4. 偏向電磁石

磁場 2 分割により、周回毎の加速位相を調整する新しい方法を提案し採用している。即ち、AVF サイクロトロン の磁極の様に磁場強度の強い部分 (ヒル) と弱い部分 (バレー) を設け、両者の磁場強度比と偏向角により加速位相の調整を行う。磁極形状は複雑であり、3 次元磁界解析による磁場分布の最適化が必要になる。ビーム収束は偏向電磁石の漏れ磁場収束を用いるので、磁極端部の磁極形状の最適化も必要となる。

5. 逆偏向電磁石

垂直方向ビーム集束、および加速 1 ターン目、即ち、加速空洞を一回目に通過した電子の軌道を制御し、再度反対方向から加速空洞に入射するために用いる。複雑な形状であり 3 次元電磁界解析による最適化が必須である。

6. 収束電磁石

コンベンショナルな電磁石を用い軌道収束を行う。逆変更電磁石に隣接した 2 つの 4 極電磁石によりビームを所定のサイズに整形する。この電磁石は偏向電磁

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

石の漏れ磁場による収束の不確定項を補正する働きもする。

加速エネルギー 5MeV ~ 16MeV、出力 50kW ~ 100kW の機種的主要パラメータを表 3.1 に示す。図 3.2 は 5 MeV 機の平面図、図 3.3 は組み立て後の写真である。高さが 1.1m 程度であるため、自己遮蔽が比較的容易にできる。滅菌・殺菌処理では、被照射物を放射化させないために、X 線照射の場合の 1 次電子ビームのエネルギーの上限は 5MeV、電子線照射の場合は 10MeV と決められている [51]。本加速器のエネルギーアップは、加速空洞を追加することで対応でき、サイズは表 3.1 に示すように長さが加速空洞の分だけ長くなるだけである。また、陽電子発生装置への適用などを目的にした場合、最大 16 MeV までのエネルギーアップが可能であり、その場合は加速電圧及び周回数を増やす構成とする。

表 3.1: CW マイクロトロンの主パラメータ

	5 MeV machine	10 MeV machine	16 MeV machine
Beam power (kW)	50	10	90
Beam current (mA)	10	10	5.6
RF frequency (MHz)	500	500	500
RF power (kW)	90	180	200
Accelerator dimension	1600×3900	1600×4700	2100 ~ 2500
W×D×H(mm)	×1100	×1100	×4700×1100
Weight (ton)	10	11	15

3.2 大出力電子線加速器 CWマイクロトロンの基本構成

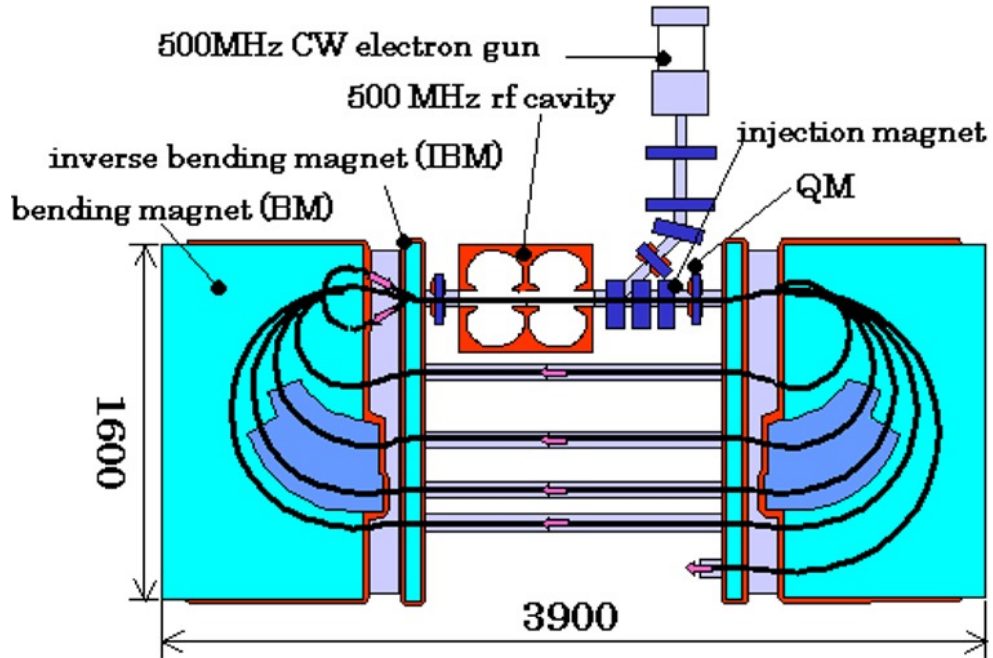


図 3.2: 5MeV CW マイクロトロン の 平面図

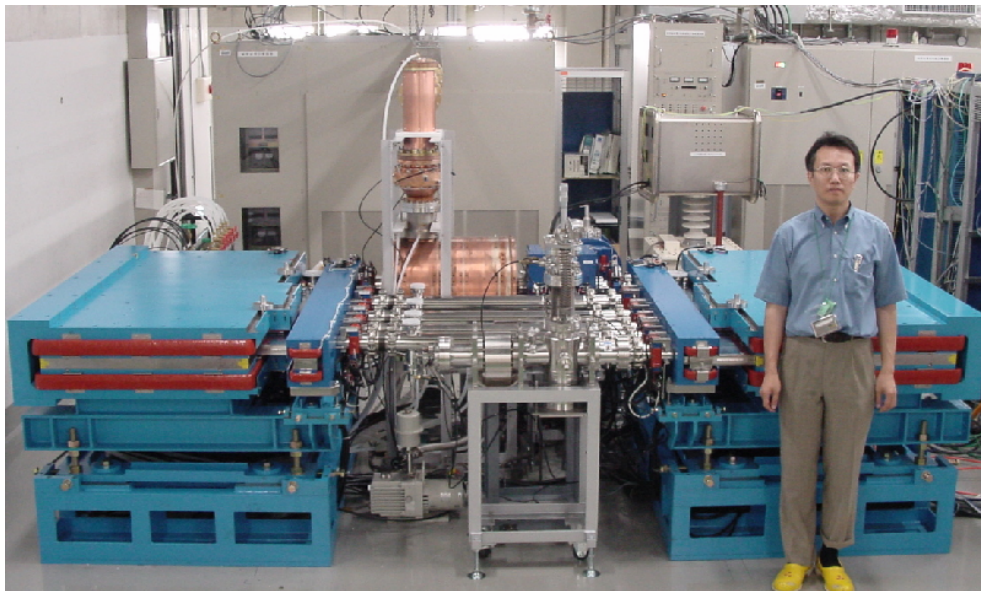


図 3.3: 5MeV CW マイクロトロン の 外観

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

3.3 500MHz RF 加速空洞の高周波特性の検討

500MHzRF 加速空洞において高電力効率を得るための空洞形状最適化手法について述べる。次に、電子ビーム大出力化のための空洞構造について検討する。

3.3.1 空洞形状と高周波特性の最適化

(a) 開発方針

本加速空洞開発で最も重要なパラメータは、電力効率（ビームパワー / 投入 RF パワー）であり、できるだけ壁損失の小さい空洞を設計する必要がある。次の 2 点を考慮した最適設計を行う。

第一に、従来の放射光装置に用いられる 500MHz 加速空洞は加速する電子は光速に近い ($\beta = v/c \approx 1$) のに対して、本加速空洞は電子入射エネルギーが 80keV であるために、加速中は電子の速度は β は 0.5 から 1.0 へと変化する。従って、加速空洞の電力効率を向上させるために、空洞の寸法を決める際は、この電子速度の変化を考慮しなければならない。

一方、ビーム加速シミュレーションの概略検討から、加速空洞は 2 連セル空洞とし、80keV の入射電子は 6 回空洞を通過し加速させることで 5MeV の運動エネルギーを得る構成とする。空洞設計方針としては、必要な加速エネルギーが得られると同時に、空洞内の RF 壁損失をなるべく小さくするような空洞形状と寸法を決めることが重要である。また、空洞の電場最大値があまり大きくならないように配慮することも放電設計上必要である。

(b) シャント抵抗 R_a と全体形状

加速空洞の電力効率を表すためには、シャント抵抗 R_a という量が用いられる。これは加速ギャップ電圧 V_{gap} と空洞内壁に流れる RF 壁電流によるジュール損失 P_{wall} によって定義される。

$$R_a = \frac{V_{gap}^2}{P_{wall}} \quad (3.1)$$

同じ加速電圧を発生する場合には、シャント抵抗が大きい方が、損失が小さくて済み、電力効率も向上する。

3.3 500MHz RF 加速空洞の高周波特性の検討

図 3.4 に文献 [50] の Spring-8 放射光装置にある 500MHz 空洞断面形状を示す。図 3.4 の空洞は 5 連セル空洞から構成されており、セル間はカップリングスロットが設けられており、電磁波エネルギーがすべてのセルに行きわたるようになっている。RF 入力 は真中のセルのみから導入している。一方、CW マイクロトロンで採用した 2 連セル 空洞の場合、民生利用のために電力効率を向上させる必要がある。従って、まず空洞 内壁に流れる RF 壁電流によるジュール損失を減らすことが必要である。図 3.5 は同加 速空洞の Superfish[52] による 2 次元解析モデルを示す。図 3.6 に示すような丸い内壁を 持ったセル空洞を検討し、図 3.5 の SPring-8 の加速空洞と比較した。

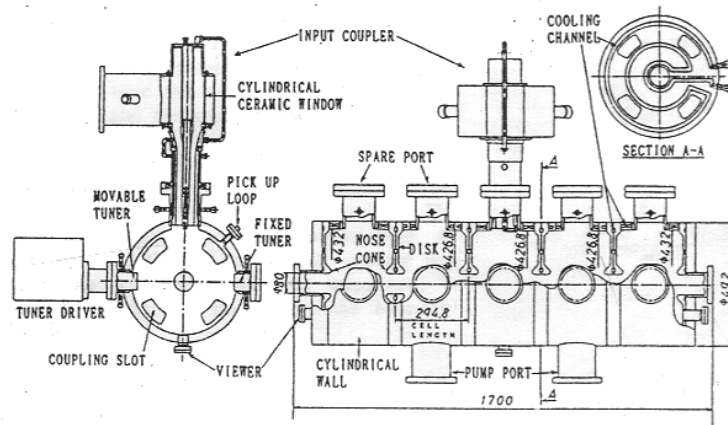


図 3.4: SPring-8 の 5 連セル 500MHz 加速空洞 ([50] を引用)

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

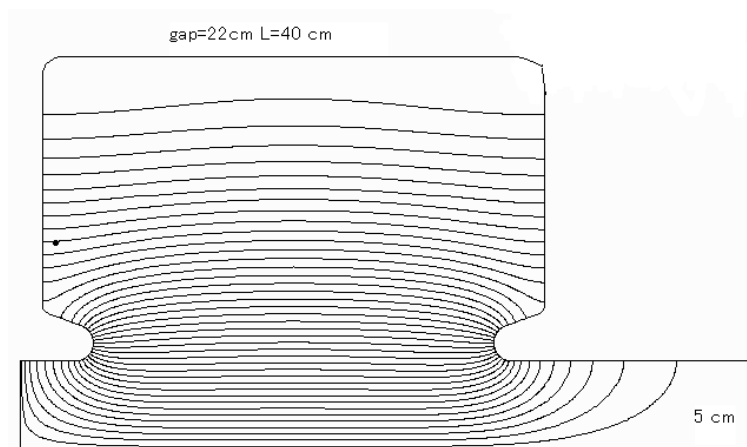


図 3.5: SPring-8 の 5 連セル 500MHz 空洞の Superfish モデル

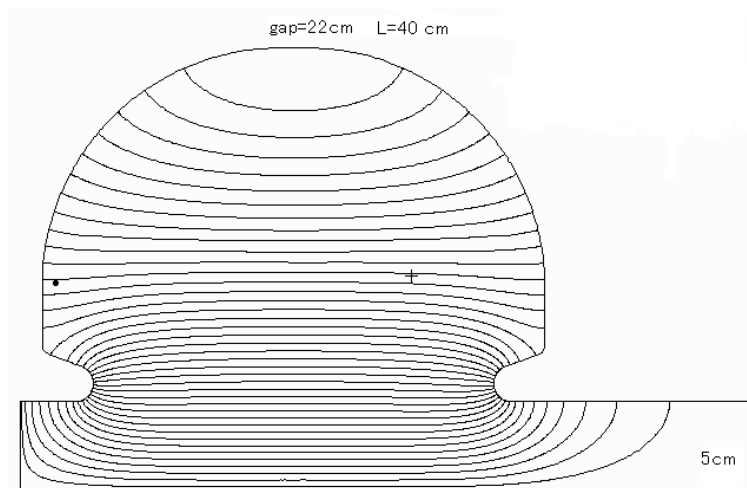


図 3.6: 内壁を丸めた形の 500MHz 加速空洞

図 3.6 に 2 次元高周波解析コード Superfish を用いて得た加速モード (TM01 またはモード) の電場分布を示す。また、表 3.2 に同 Superfish で計算したシャント抵抗を示す。

表 3.2 から分かるように、空洞ギャップを一定にした場合には、空洞内壁を丸めた形状にした方が、シャント抵抗が大きくなり、電力効率が向上する。図 3.4 に示す形状の空洞は図 3.5 に示した SPring-8 の空洞より約 9% 壁損失が少なくなる。よって、2 連セル構造の本加速空洞は、内壁を丸めた空洞形状を選択する。

表 3.2: 空洞形状とシャント抵抗比較

空洞形状	Rounded Wall	Straight Wall
Duct length (mm)	100	100
Bore radius (mm)	50	50
Gap (mm)	220	220
R_a (effective) (M)	9.66	8.8

(c) 最適空洞形状の選択

2連セル空洞の最適空洞ギャップ g 、セル長 L 、セル間壁厚 t 、を決める必要がある。そのために、80keV の電子を6ターン加速で5MeVまで加速する1次元電子加速シミュレーションによる形状最適化を行う。各ターンにおける加速ギャップを決める際は、空洞入射位相はエネルギーゲインが最大になる最適位相時とする。実際の手順を図3.7に示す。尚、実際の運転では位相安定性の観点から加速位相はずらしている。

各パラメータにおいて、まず Superfish を用い、空洞中心軸上加速電場分布 $E_z(z)$ とシャント抵抗 R_a 、および電子が加速ギャップ通過中の電場の位相変化を考慮した Transit Time Factor を計算する。この際、電子の速度変化 ($\beta = 0.5$ から 1.0 へと変化) も考慮する。加速ギャップ通過時のエネルギーゲイン δW はギャップの中央を原点として、セル長を L 、平均電場を E_0 、加速位相を Ψ 、Transit Time Factor を T として、(3.2) 式で表される。

$$\begin{aligned}
\delta W &= \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} eE_z(z) \cos\left(\Psi + \frac{\omega z}{c\beta}\right) dz \\
&= eE_0 L \cos \Psi \frac{\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} eE_z(z) \cos\left(\Psi + \frac{\omega z}{c\beta}\right) dz}{\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} eE_z(z) dz} \\
&= eE_0 L T \cos \Psi
\end{aligned} \tag{3.2}$$

次に、この電場分布を有する 500MHz の RF 電磁場を用いて電子の加速シミュレーションを行い、5MeV の加速エネルギーを得るための必要加速電圧 V_g を算出する。この V_g と Superfish で得られたシャント抵抗 R_a を用いて (3.1) 式に従い、2連セル空洞における RF 壁電流損失 P_{wall} を計算する。図3.7に示すように、パラメータを変更し計

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

算を繰り返すことによって、壁損失 P_{wall} を最小になるようなパラメータを決定する。

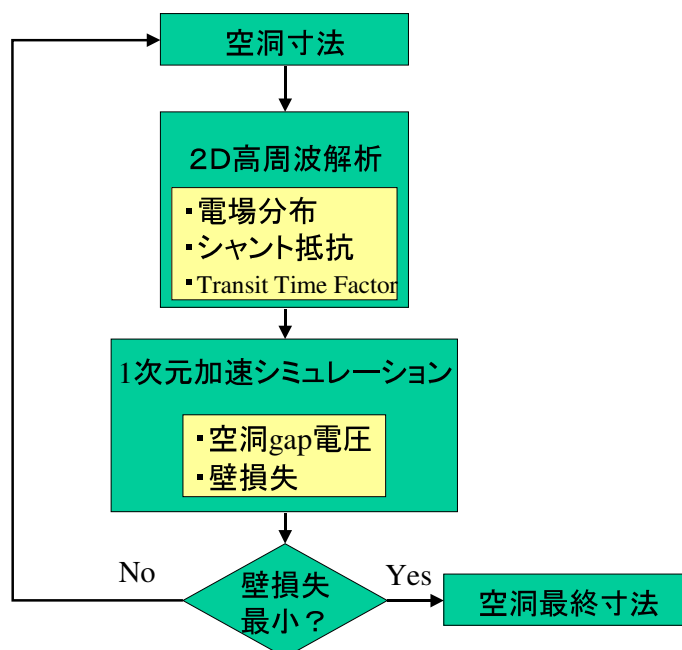


図 3.7: 空洞寸法パラメータ最適手順

加速ギャップ

まず、空洞加速ギャップの大きさと空洞壁損失の関係を調べた。加速ギャップを変化させて、Superfish を用いて加速モード (モード) における軸上電場分布を求めた後、1次元加速シミュレーションを行った。結果を図 3.8 に示す。この図から、本加速空洞の加速ギャップは壁損失が最小となる 17cm と設定した。SPring-8 放射光施設での空洞より約 5cm 狭くなっている。図 3.9 は電子エネルギーが 6 回加速される途中 80keV から 5MeV まで変化する様子を示している。

3.3 500MHz RF 加速空洞の高周波特性の検討

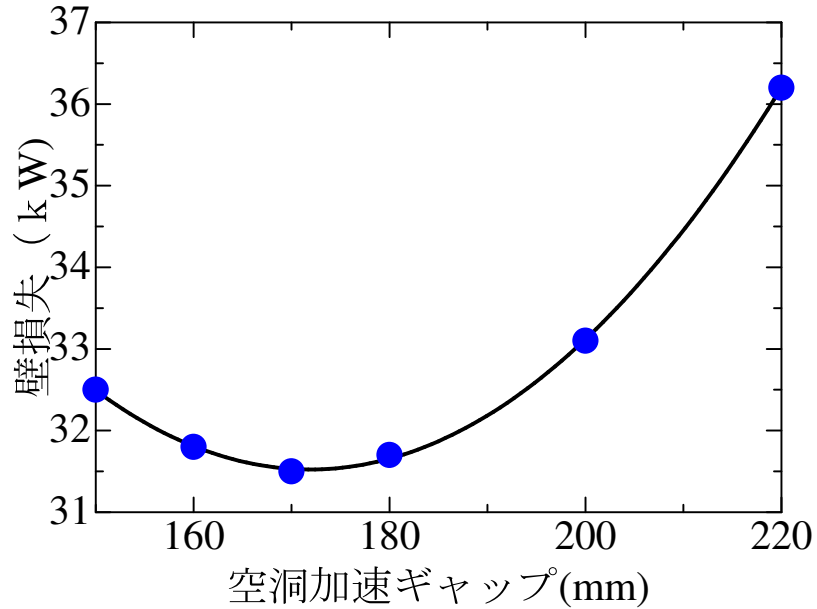


図 3.8: 加速ギャップ最適化によるギャップと壁損失の関係：1次元加速シミュレーションによる2連セル空洞6回通過後（加速エネルギー 5MeV 時）による壁損失である。

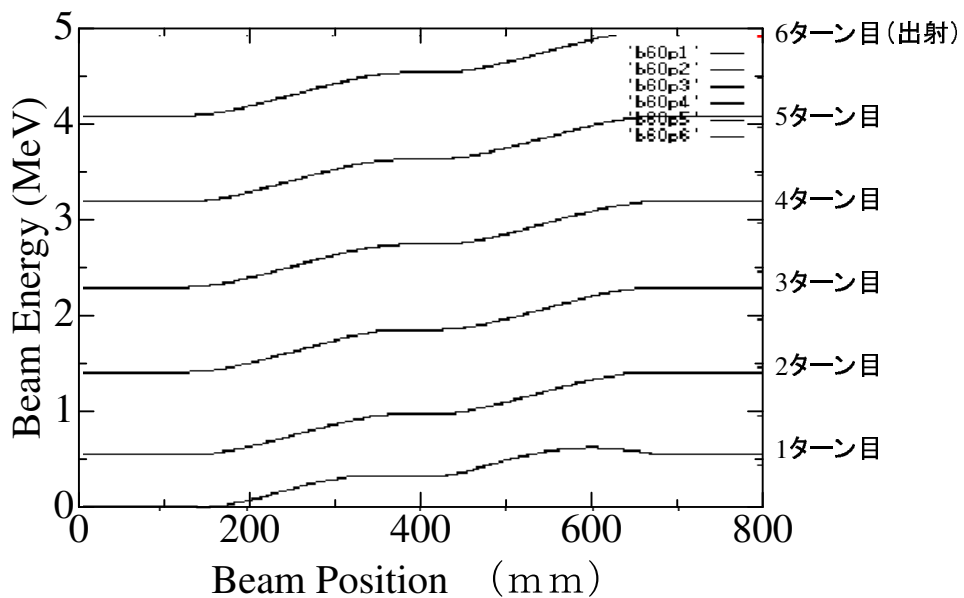


図 3.9: 1次元加速シミュレーションによる加速エネルギー変化

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

空洞セル長

図 3.10 は空洞セル長 L と壁損失 P_{wall} の関係についてシミュレーションした結果を示す。図から分かるように、壁損失はセル長との間に相関がある。本加速空洞のセル長は、壁損失が最小となる 294mm とした。壁損失 (空洞壁温 20 時) は約 31.4kW である。最適化の条件を図 3.10 のキャプションに記述する。

空洞セル間隔

図 3.11 は 2 連セル空洞の二つセルの間壁厚み t と壁損失 P_{wall} の関係を示している。壁厚み t が小さい程、壁損失が小さくなる。但し、セル間壁には、冷却水を流す溝を設ける必要があるため、 t をあまり小さくできない。また、機械的強度の問題もあるので、従来例を参考に t を 24mm とした。この値の妥当性については 3.4 節の熱・構造解析で確認した。

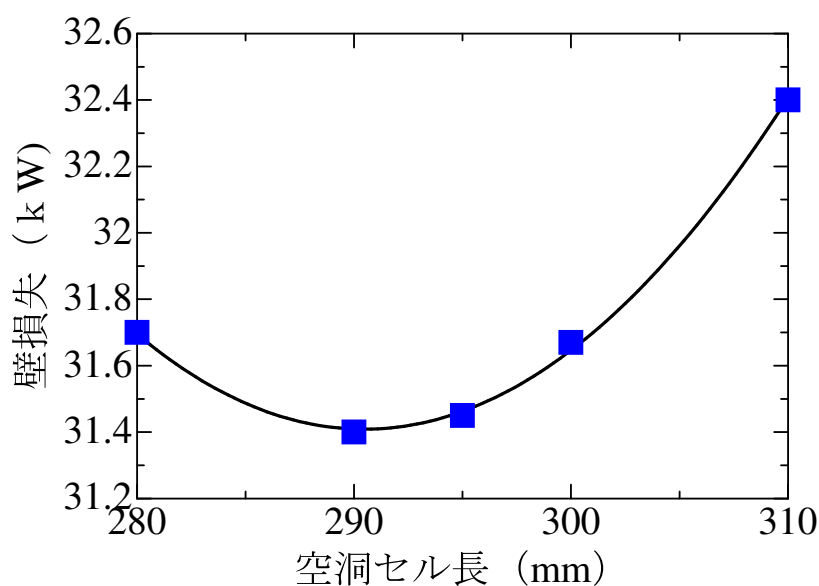


図 3.10: 加速空洞セル長さ と壁損失の関係：加速ギャップ $gap=170mm$, セル間隔 $t=12mm$, ノーズコーン曲率半径 $r_1=10mm, r_2=6mm$, 内壁半径 $r_3=120mm$, ボア径 $2a=65mm$, モード周波数 $f_0 = 500MHz$, 壁損失は空洞温度 20 と仮定。3.4 節の熱構造解析によると、動作中は空洞温度上昇が約 20 であるため、その際壁損失は約 3.7% 増える。

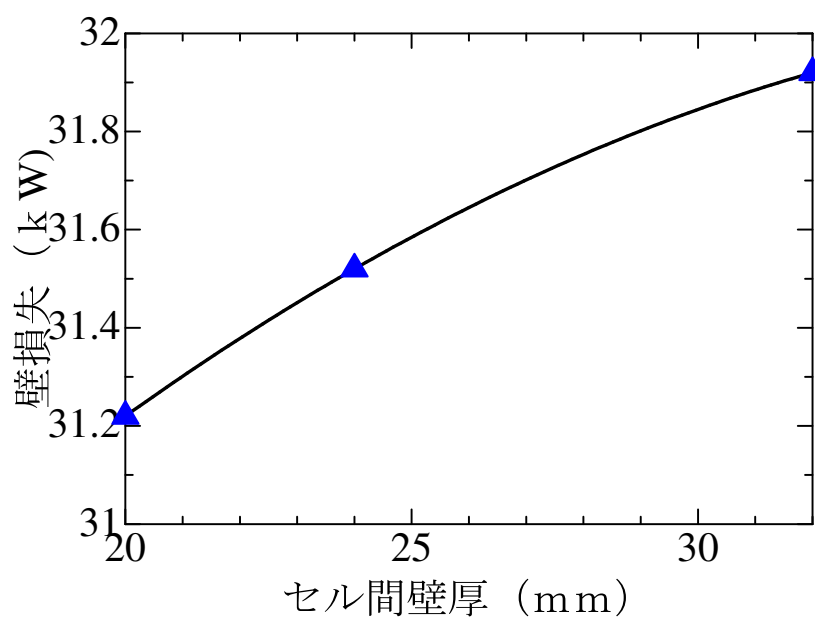


図 3.11: セル間壁の厚さと壁損失の関係 : ボア径 $2a=60\text{mm}$, セル長 $L=294.73\text{mm}$, 加速ギャップ $g=170\text{mm}$, セル間壁厚は小さいほうが良いが冷却配管スペース及び機械強度を考慮し、SPring8 放射光施設で実績のある値 $t=24\text{mm}$ とした。

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

空洞ボア径

図 3.12 に空洞ビームポートボア径と軸上加速電場分布を示す。表 3.3 に 1 次元加速シミュレーションによって得たボア径と壁損失の関係を示す。

表 3.3: ビームポートボア径と壁損失の相関 (ギャップ 220mm、図 3.5 形状の場合)

ボア径 (mm)	Ra(M)	壁損 P_{wall} (kW)	必要加速電圧 $V_{gap}/cell$ (MV)
100	18.13	45.08	0.6393
80	19.11	39.97	0.618
60	20.13	36.22	0.6038

表 3.3 から分かるように、空洞ビームポートボア径を従来の 100 から約 60 にした際、加速空洞の壁損失が約 20%減少する。ビームポートボア径が小さい方が、加速電場が空洞内に集中し (図 3.12 参照)、第一回目通過における Transit Time Factor が向上し、加速効率が向上するためである。従って、ビームポートボア径をなるべく小さくした方が電力効率は向上する。ただし、実際は、電子ビームが空洞を通過する際、有限なビームサイズを持っているので、横方向を含めた加速シミュレーションで必要なビームポートボア径を決める必要がある。このような検討から、ビームポートサイズを 65mm と決めた。

空洞ギャップ g を 170mm と選定した後の壁損失電力 P_{wall} とビームポートボア径の関係を表 3.4 に示す。2a が 65mm の場合は $\beta=1$ の時の従来空洞の 100mm 場合と比べ、壁損失が約 23%少ないことが確認された。同結果を図 3.13 にも示す。

表 3.4: 壁損失とボア径寸法の関係 (セル gap=170mm, 内壁曲率半径 $r_3=120$ mm 時)

2a (mm)	P_{wall} (kW)
60	30.47
65	31.44
80	34.84
100	40.47

3.3 500MHz RF 加速空洞の高周波特性の検討

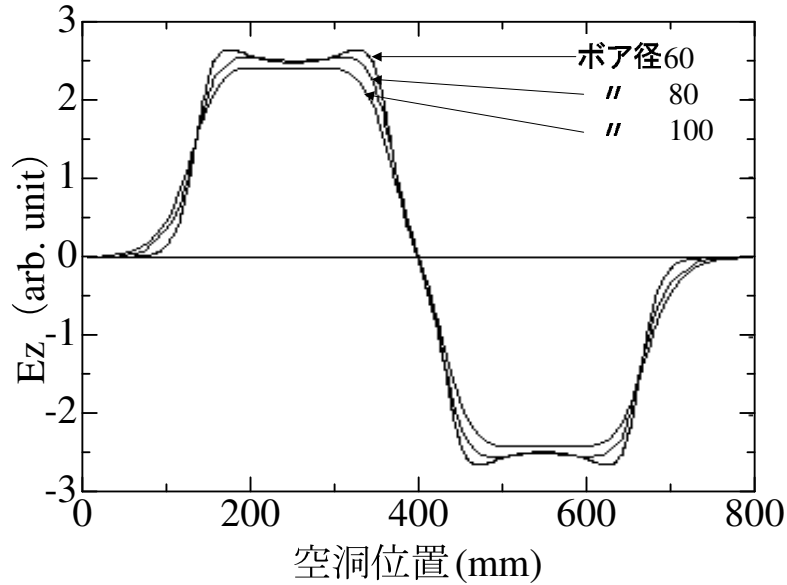


図 3.12: ビームポートボア径と軸上加速電場分布の相関：2 連セル空洞の場合は、モードで、両セルにおける電場の位相がちょうど逆転している様子が示されている。ボア径が小さい方が、加速電場分布が空洞内で収縮している。

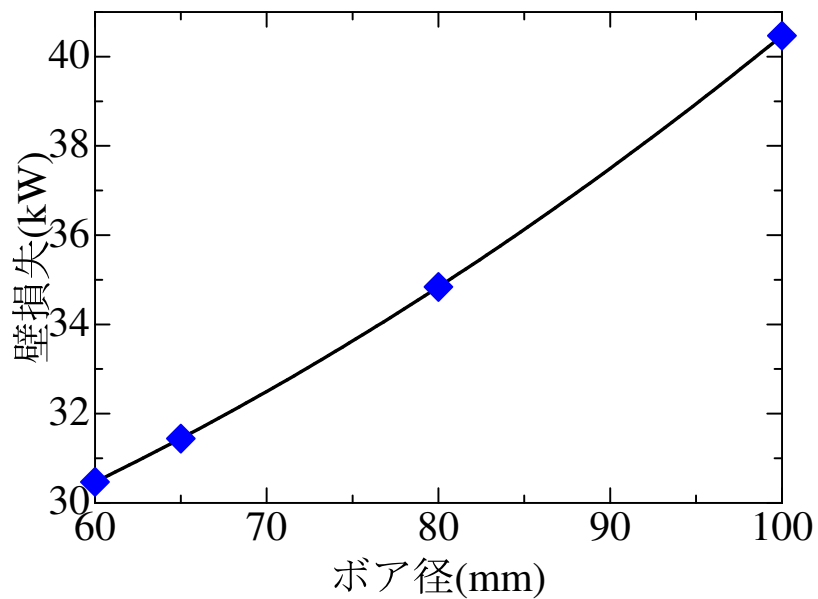


図 3.13: 壁電流損失とビームボア径の関係：ボア径が小さい方が電力効率は上がるが、本加速空洞においては電子ビームサイズを考慮しボア径 $2a = 65\text{mm}$ とした。

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

形状及び寸法まとめ

図 3.14 に今回設計した CW 加速器用 2 連セル加速空洞の基本形状を示す (片セルのみ示す)。表 3.5 にその基本寸法をまとめる。表 3.6 にこの 2 次元検討段階における加速空洞の重要パラメータを示す。表 3.6 に示したパラメータは 3 次元形状を反映した実際の空洞では多少変わる。例えば、2 連セル加速空洞のセル間に開けられるカップリングスロットによる壁損失の上昇がある。また、空洞寸法に関しては、3 次元形状を考慮すると空洞内壁最大内径の値を変えて周波数調整する必要があるが、表 3.5 に示した値はその影響を考慮した最終値である。空洞に付属するカプラポートや真空ポート及び、熱変形、周波数チューナ初期位置及びカップリングスロットの影響等により、共振周波数は 2 次元計算の値と異なる。従って、図 3.14 と表 3.5 に示した加速空洞の空洞内壁最大内径寸法では、Superfish 計算では、モード周波数 f_{π} は 500MHz より若干高い値を設定し、前述の 3 次元ポート類等を加えた影響を考慮に入れた設計としている。この詳細は 3 次元電磁界解析コード MAFIA[53] を用いて次節にて検討する。

図 3.15 には、図 3.14 に対応する加速空洞ビーム軸上におけるモード加速電場分布 $E_z(0, 0, z)$ を示す。横軸は 2 連セル加速空洞における位置座標 z で、縦軸は加速電場の z 成分を示す。

表 3.5: 設計した CW 加速器用 2 連セル加速空洞基本寸法 (注 1)

項目名	符号	寸法 (mm)
ビームポートボア径	2a	65
空洞長/セル	L	294.7
セルギャップ長	g	170
ノーズコーン傾斜角		30 度
ノーズコーン先端曲率半径	r1	10
ノーズコーン根元曲率半径	r2	6
空洞内壁曲率半径 (丸めた形状)	r3	120
2 セル間壁厚	t	12
ビームダクト部長さ	*	約 30
空洞内壁最大内径	2b	448.1

注 1: 2 セル間はセル間壁にあけられるカップリングスロットによって結合する

3.3 500MHz RF 加速空洞の高周波特性の検討

表 3.6: 設計した CW 加速器用 2 連セル加速空洞重要パラメータ

周波数	502.026 MHz (注 2)
加速モード	
unloaded Q	40944 (注 3)
シャント抵抗 Ra	17.2 M (注 3)
ギャップ電圧	0.5195 MV (注 4)
壁損失 P _{wall} /セル	31.4 kW(注 5)
最大発熱密度	6.016 W/cm ²
最大電場	6.727 MV/m
最大磁場	4536.96 A/m
最大電場磁場 Ratio	0.8475
Kilpatrick Ratio	0.315
周波数感度 $f_{\pi}/$ (2b)	-1.1 MHz /mm
周波数感度 $f_{\pi}/$ (g)	1.02 MHz /mm
周波数感度 $f_{\pi}/$ (2a)	-300 kHz /mm
周波数感度 $f_{\pi}/$ (L)	47 kHz /mm
周波数感度 $f_{\pi}/$ (r3)/片側	387 kHz /mm
周波数感度 $f_{\pi}/$ ()	80 kHz /deg
モードセパレーション (仕様)	0.8 MHz 以上 (注 6)

注 2: 後述する各種ポートによる影響、3次元解析の計算精度の影響を考慮し、上記周波数を 2次元設計の設定周波数とした。

注 3: Superfish の結果で、室温 20 時の値である；実際値は、カップリングスロット、各種ポート、空洞温度上昇などの原因で、この値より下がる。

注 4: 1次元加速シミュレーションによる結果である。実際は位相安定性等を考慮する必要があるので、僅か大きくなる可能性がある。

注 5: 空洞内壁温度が 20 の値。実際、運転時空洞温度上昇が約 20 であるため壁損失が約 3.7

注 6: SPring-8 を参照にした値。実際は、これが得られるように、カップリングスロットの位置と形状を決めた。

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

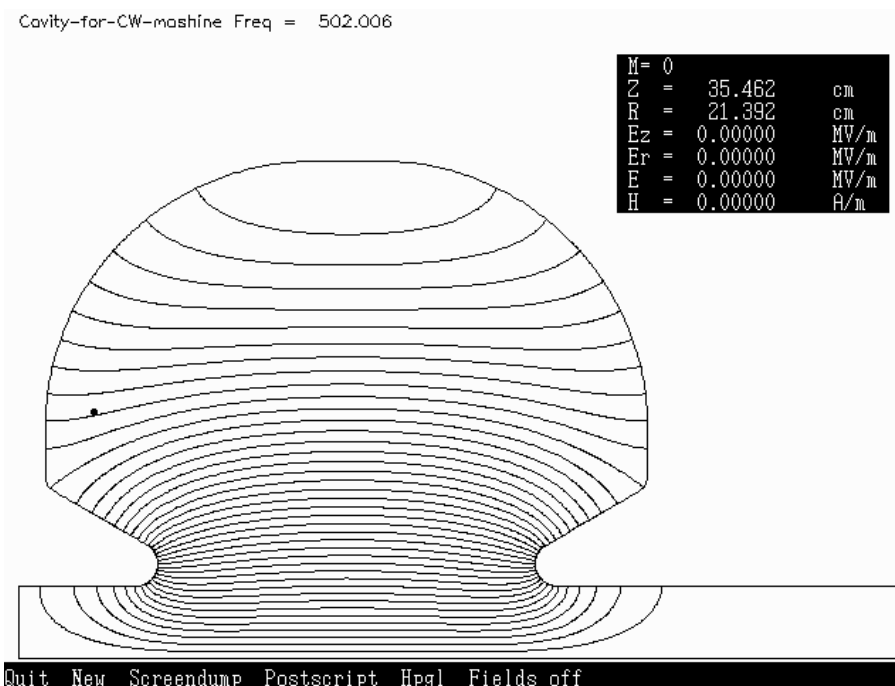


図 3.14: 設計した CW 加速器用 2 連セル加速空洞形状 : 図には、モード電気力線が空洞セル断面モデルと一緒に表示されている。寸法は表 3.5 に示した。

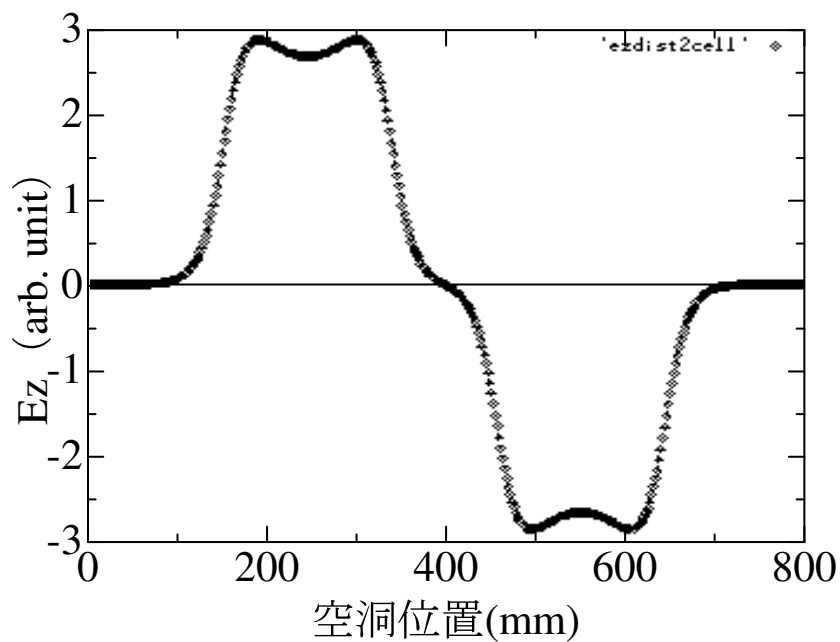


図 3.15: 設計した 2 連セル加速空洞中心軸における加速電場分布 : 2 次元対称モデルを仮定し、Superfish コードを用いて得られた。形状と寸法はそれぞれ図 3.14 と表 3.5 を参照。

3.3.2 3次元構造を考慮した2連セル空洞設計

実際の加速空洞は図 3.16 に示したように、2つの加速セル構造を有し、セル間には結合穴 (RF カップリングスロット) が設けられている。各セルには以下に示す各種ポートが構成される。

1) カプラポート	1 個
2) 真空排気ポート	1 個
3) 真空ゲージポート	2 個
4) 空洞内磁場ピックアップアンテナポート	2 個
5) ビームポート	2 個
6) チューナポート	2 個
7) カプラ部放電監視ビューポート	1 個

これらのポート類の共振周波数や加速電磁界分布への影響を厳密に考慮した3次元解析を行う。また、各ポートにおける RF 壁電流による発熱量と分布を計算し、空洞の機械設計と製作に反映させる。

図 3.16 と図 3.17 に設計した空洞の構成要素を示す。尚、図 3.17 では、3次元計算でモデルのメッシュ数を抑えるため、真空用ポートとカプラポートを同一側面に位置しているが、実際の位置は図 3.16 に示した通りである。

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

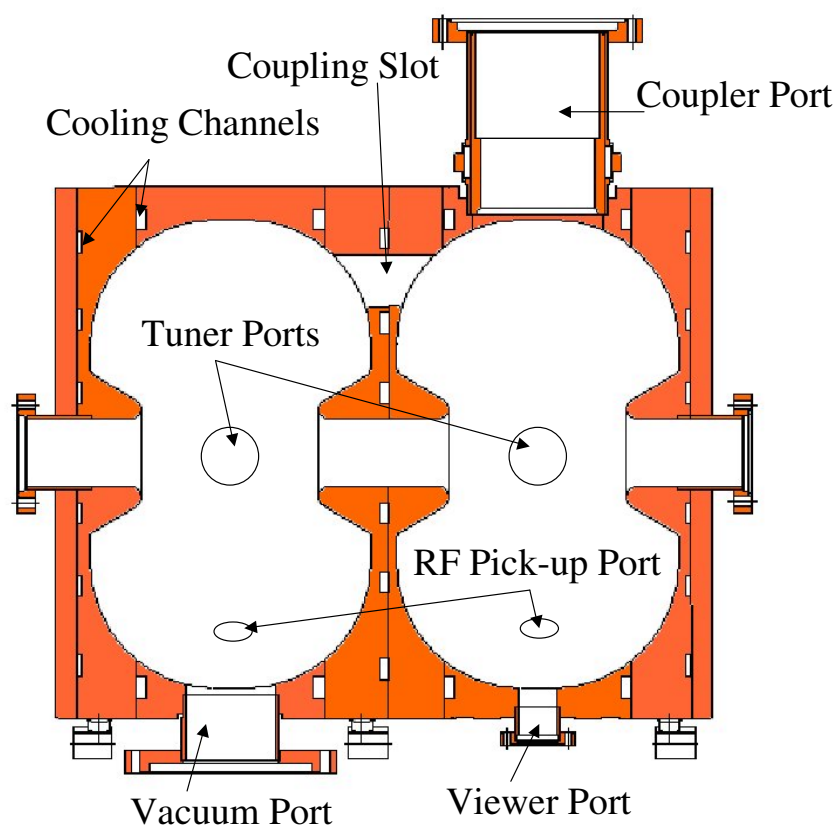


図 3.16: 空洞構成要素

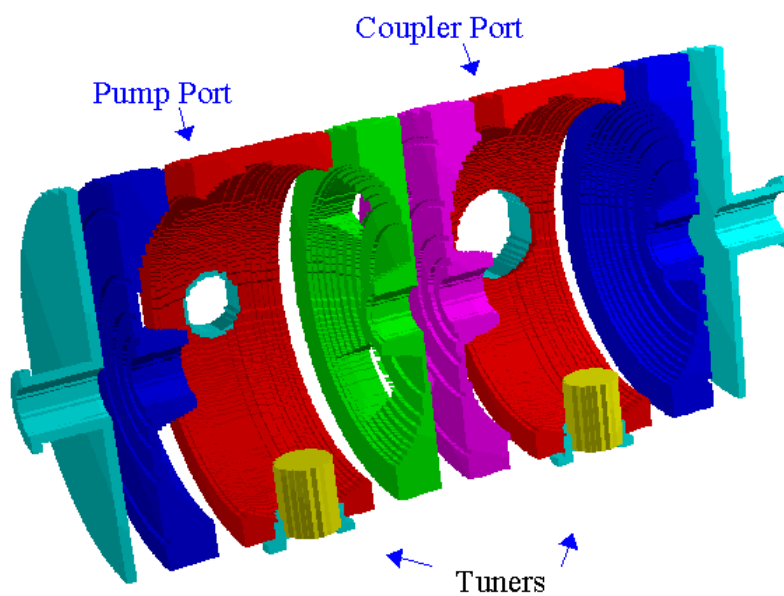


図 3.17: 空洞三次元形状概略図

(a) Coupling Slot 形状最適化

加速空洞は2つのセルから構成されているが、RF パワーの導入は1セルに設けたループコプラから行われる。そのため、もう一方のセルにRF パワーを導くには2つセルの間壁にカップリングスロットと称される穴を設けて行う。KEK-PF 等のSR 放射光施設の例を参照して、図 3.18 に示すように4つのカップリングスロットを設けることとした。尚、カップリングスロットの穴径と位置は空洞における π モードと $\pi/2$ モー

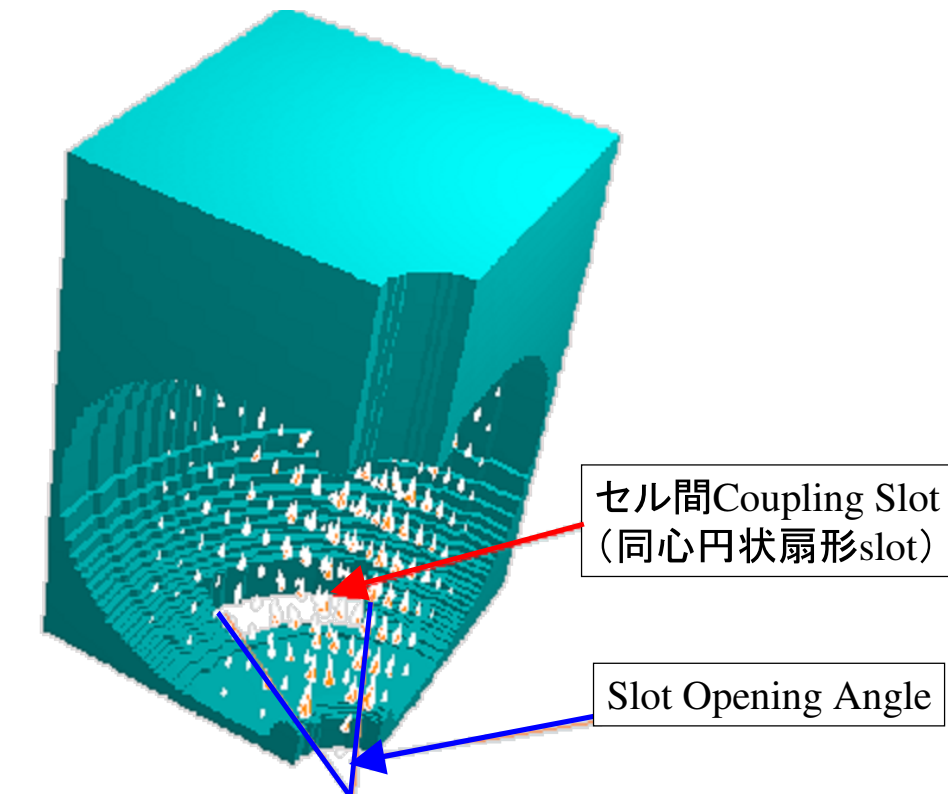


図 3.18: セル間に設けたカップリングスロットモデル (1/8 カットモデル)

ドの共振周波数の差が従来例 [50] を参考して約 0.8MHz 位になるように MAFIA を用いて決めた。加速モードである π モードの磁場分布はビーム軸から離れた所が一番強いので、カップリングスロットのビーム軸からの位置をなるべく大きくした。

図 3.19 は π モードと $\pi/2$ モードの周波数の差をカップリングスロットの Opening-

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

Angle の関数として示した。この解析結果から、今回製作する空洞のカップリングスロットの Opening-Angle を 30 ° に選択した。尚、カップリングスロットの内半径は 140 mm で、外半径は 190 mm として、ビーム軸を対称に 4 つ配置した。また、セル間の

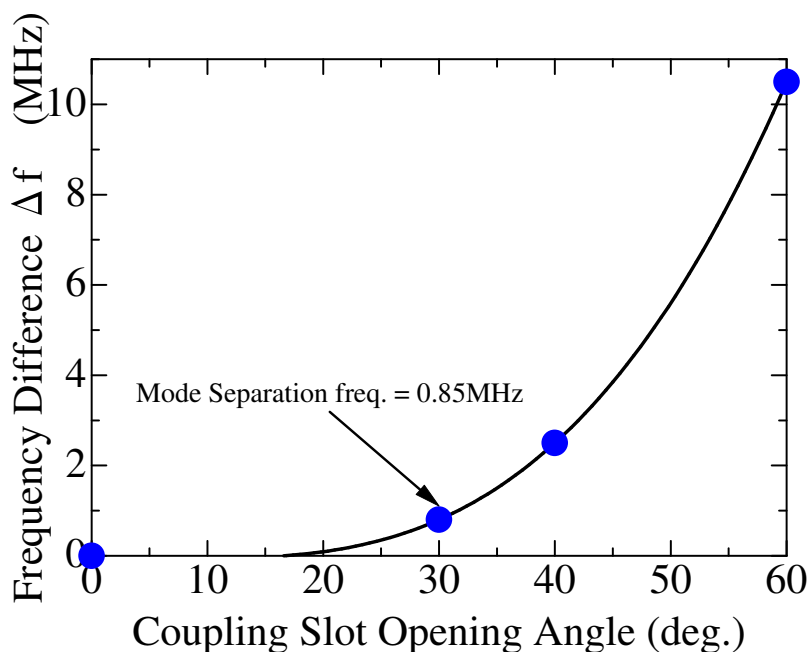


図 3.19: モード分離とスロット大きさ (MAFIA 結果)

カップリングスロットの導入は、空洞内電磁場分布の乱れをもたらすので、モードの周波数及び空洞 Q 値にも影響する。この詳細も MAFIA で検討した。結果はそれぞれ図 3.20 と図 3.21 に示す。この図から分かるように、カップリングスロットの導入によって、スロット周りにおける発熱が増え、空洞のシャント抵抗を約 4% 低下させることになっている。尚、スロットの存在はモードの周波数にも影響を与え、空洞の空洞内壁最大内径を決める際には、この効果と Superfish の結果を合わせて行った。つまり、MAFIA の解析結果は周波数の補正に用い、周波数の絶対値は Superfish 結果をベースにした。このことは後程記述する各ポートの周波数に与える影響も同様に考慮した。3.6 節で述べる製作した空洞の低電力測定試験結果はこの方法の有効性を実証した。

3.3 500MHz RF 加速空洞の高周波特性の検討

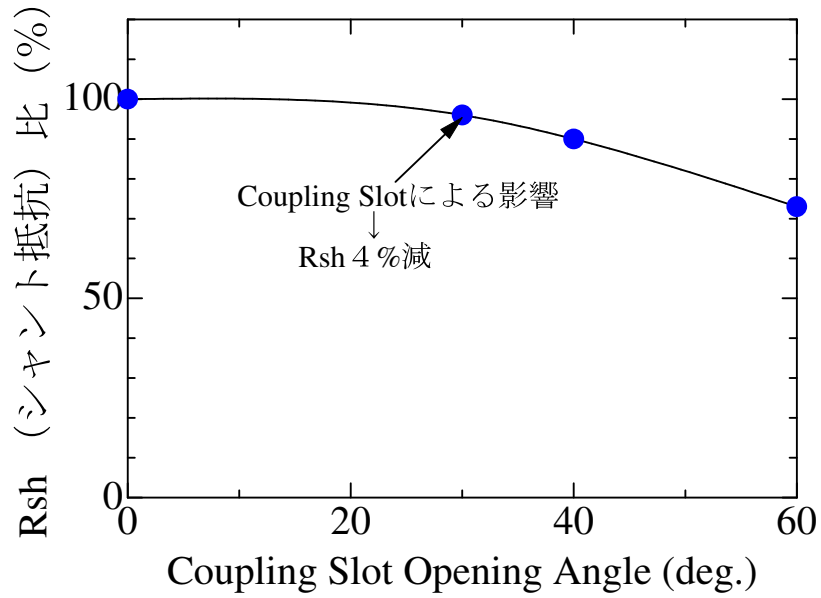


図 3.20: モードにおけるシャント抵抗とスロット大きさ

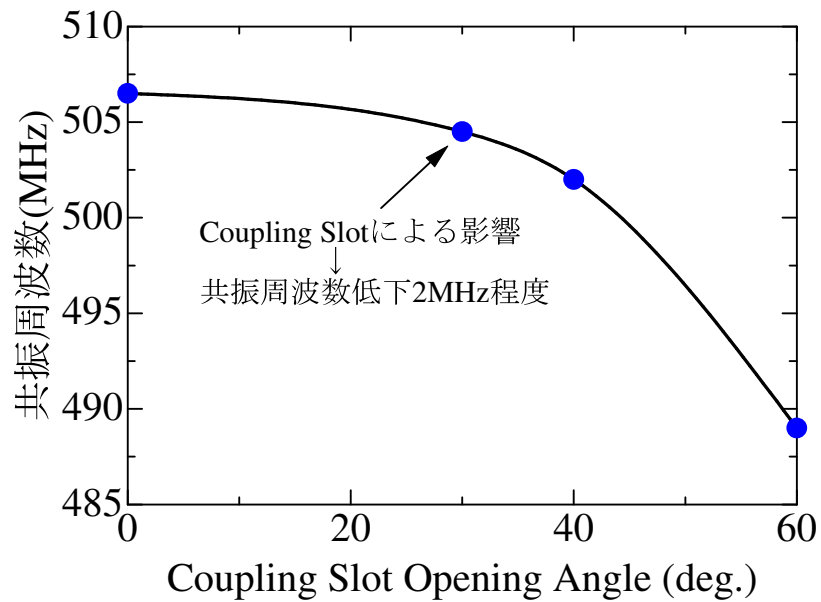


図 3.21: 周波数変化とスロット大きさ

3. 大出力電子線加速器 CWマイクロトロンの500MHzRFシステムの開発

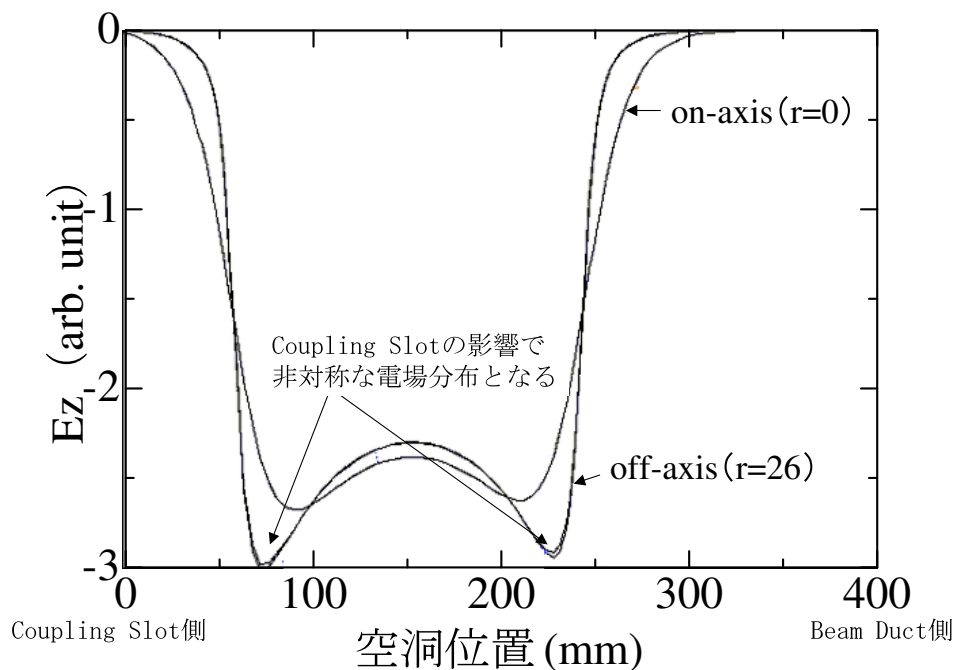


図 3.22: カップリングスロットが電場分布に与える影響

また、カップリングスロットがある場合には、空洞内の3次元電場分布に非対称性をもたらすことは図 3.22 から容易にわかる。この図では、軸上 ($r=0\text{mm}$) 電場分布とオフ軸上 ($r=26\text{mm}$) における電場分布をプロットしてある。スロットによって電場分布がスロット側において、ビームポート側に比べ、若干強い傾向が見られた。実際に、空洞製作後行った低電力測定試験ではこの様子が確認されている。

(b) 各種ポート部影響検討

RF 周波数の影響

大口径のカプラポートおよび真空ポートについて、RF 周波数への影響を先ず検討する。カプラポートは空洞の一セルに設けられ、その寸法は従来の 500MHz 空洞用カプラ [54] を参照して決め、ポートの直径を 110 mm とした。また、このポートによるモード周波数の変化と発熱を検討するため、カプラのループと中心導体の形状も従来例を参照し、MAFIA を用いてモデル化した。図 3.23 にはカプラポートと共に、真空ポンプポートの 3 次元形状を示した。この MAFIA モデルを用いて、カプラと真空ポートが有無の場合における周波数の差を検討した。その結果、この二つのポートによって、空洞加速モードである H_{11} モードの周波数が約 0.4MHz だけ下がることが分かった。この周波数ずれを Superfish によるポート無時の周波数に反映し、空洞の空洞内壁最大内径を決めた。この二つのポートによって空洞の Q 値が約 0.8% 下がる。

RF 壁電流による発熱の影響

各種ポートにおける RF 壁電流による発熱分布とその絶対値を MAFIA で検討した。先ず、カプラポートでの検討結果を説明する。図 3.24 は空洞セル内に H_{11} モードが励起される際にカプラポートと真空ポート周辺に発生する熱分布を示した。また、この発熱の積分値と空洞全体における発熱積分値の比から、各ポートにおける発熱量の絶対値も求めた。その結果をベースに、真空ポートにおいては SUS で製作し、内面は空洞内壁から 6cm までの範囲は銅メッキすることにした。空洞内壁からの距離に対してポート内発熱の積分値を図 3.25 と図 3.26 に示す。

図 3.25 では、カプラにおけるアンテナループ位置を空洞内壁から 30mm として計算していたが、実際製作したカプラでは約 22.4 mm である。また、どの図においても、発熱は銅に対して計算した。この解析結果から、カプラポートの周りは水冷するが、真空ポートには特別に冷却構造を設けないことにした。ビームポートとピックアップポートについても、上記同様に発熱分布を解析したが、いずれも H_{11} モード時の発熱は無視できる程度だった。

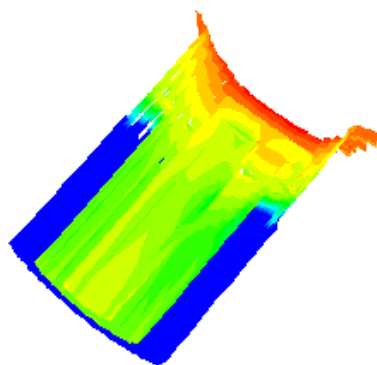
3. 大出力電子線加速器 CWマイクロトロンの500MHzRFシステムの開発

ポートによる周波数ずれ (Two-Cells)
 $\Delta f \pi = -0.8/2 = -0.4 \text{ MHz}$



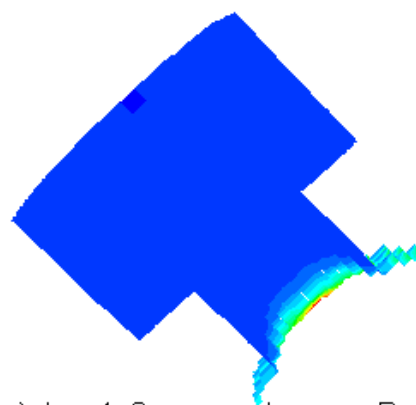
図 3.23: ポートによる周波数ずれ検討: 計算は1/4モデルで行ったので、周波数のずれは計算値の半分である

カプラポート



内面材質→銅

真空ポート



内面材質→SUS
(最初6cmは銅メッキ)

図 3.24: MAFIA で得られた加速モードにおけるポートの発熱分布

3.3 500MHz RF 加速空洞の高周波特性の検討

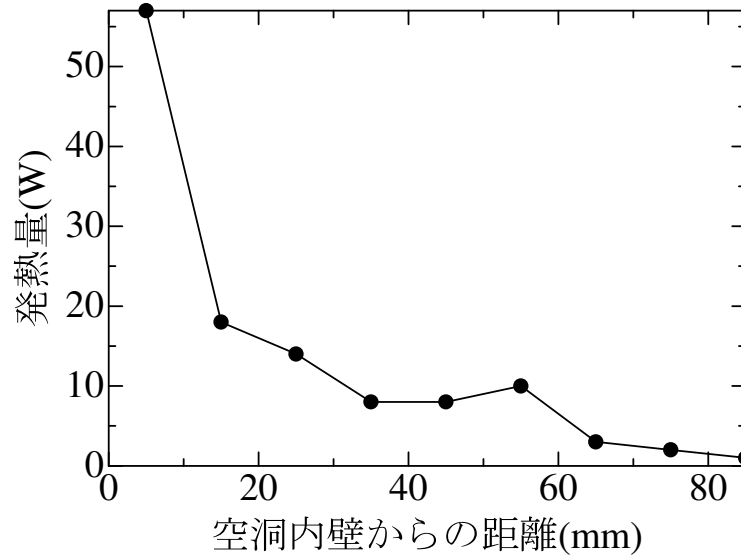


図 3.25: カプラポートにおける発熱分布：この結果からカプラポートは銅または銅 SUS の 2 重構造が望ましい事がわかる。

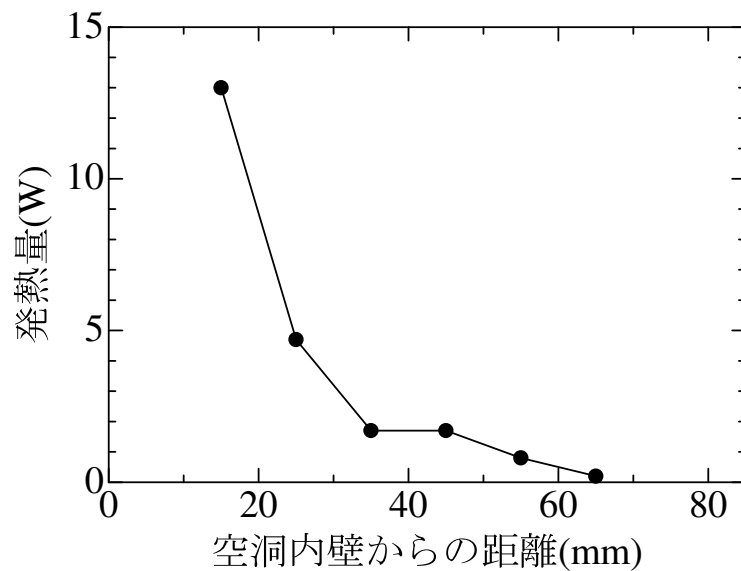


図 3.26: 真空ポートにおける発熱分布：カプラポート発熱の量が少ない。

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

(c) 空洞共振周波数および Q 値

MAFIA による 3 次元解析は文献 [55] によると、メッシュ数の制限上、本解析では約 2MHz の誤差が発生すると考えられる。一方、Superfish においては 2 次元解析ではあるが高精度な解が得られる。例として、解析解のある Pill Box 空洞で計算精度を調べた結果 40kHz 程度でよく一致する事を確認した。

よって本空洞設計では、正確な共振周波数、Q 値を得るために、まず Superfish の 2 次元解析による回転対称モデルを計算する。つぎに MAFIA を用いて各種ポート、カップリングスロットによる影響を相対変化で算出し、これらの影響を 2 次元解析結果に補正項として考慮することで空洞共振周波数および Q 値を見積ることとする。各非対称ポート類やカップリングスロットが周波数に与える相対的影響から算出した周波数補正量結果を表 3.7 に示す。

従って、Superfish での解析では、上記 3 次元形状による周波数補正を考慮した形状（空洞内壁最大内径を若干大きくしたモデル Superfish）にて計算し、モード周波数を 502.26MHz とし、表 3.7 にまとめた 3 次元形状による影響の補正かけることで、共振周波数の設計値 500.00MHz を得ることとした。

同様に、空洞の Q 値についても 3 次元形状による影響を MAFIA によって詳細検討した結果を表 3.8 に纏めた。

更に、表 3.9 に実測との比較、定常運転時の空洞温度上昇から想定される空洞消費電力を算出した。結果を表 3.9 に示す。実際運転時製作した空洞の壁損失は約 42kW 程度であることがわかった。

表 3.7: MAFIA 解析で得られた 3 次元形状部による モード周波数補正量

形状	周波数シフト [MHz]
Coupling Slots	-2.3
Coupler/Pump Ports	0.32

3.3 500MHz RF 加速空洞の高周波特性の検討

表 3.8: 3次元空洞 モード Q 値解析結果まとめ (1)

項目	Q 値または補正	壁損失 (注 1)
①Super Fish 結果	40944	31.4 kW
②Coupling-Slots 寄与	-4 %	
③Coupler/Port 寄与	-0.80 %	
④Pump-Port 寄与	-0.06 %	
⑤Tuners 寄与	-3.70 %	
① - ⑤総計 (理論値 (注 2))	37400	

注 1: 要求ギャップ電圧発生時の RF 電流壁損失 (2セル合計値)

注 2: 20 時における値

表 3.9: 3次元空洞 モード Q 値解析結果まとめ (2)

項目	Q 値または補正	壁損失
理論値	37400	
測定値	32000	
測定 / 測定	85.60 %	
温度変化 (注 1)	-3.70 %	
定常運転時 Q 値	30800	41.7 kW

注 1: RF パワー投入時、空洞温度が 20 上昇し銅の導電率変化から生じる

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

尚、電場分布については図 3.27、に示す通り 0.7%以内で一致が得られた。よって電場分布は 3次元解析結果を用いる。

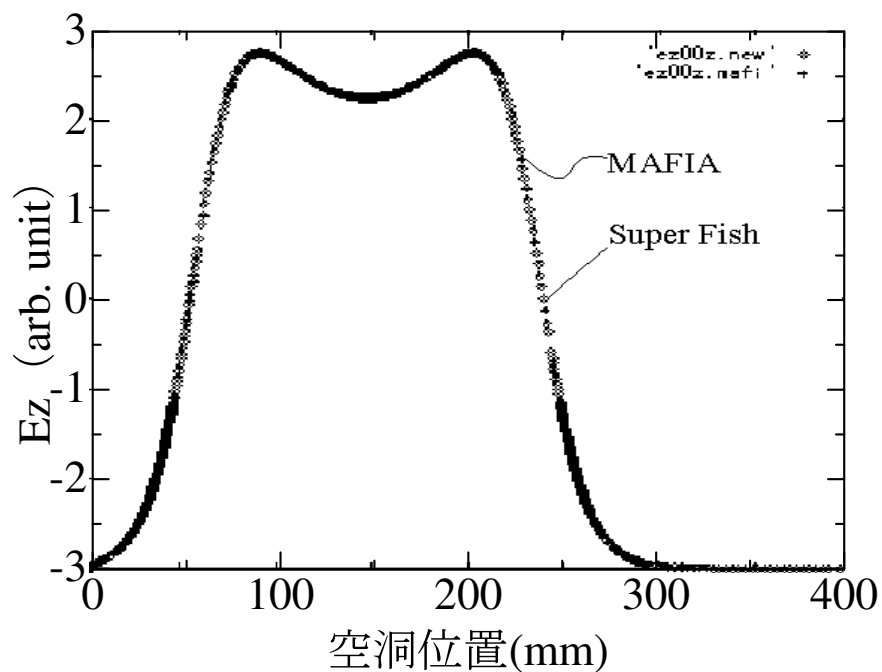


図 3.27: 3次元解析および2次元解析で得た電場分布比較

3.4 空洞の熱・構造的特性の設計

本節は高周波加速空洞についての熱・構造解析に関するものである。共振周波数 500MHz、空洞壁損失合計 40kW の冷却系の設計、および熱応力歪みに伴う共振周波数シフトを厳密に定量化し、チューナ構造の設計最適化へ反映させる。

更に、定常運転時の空洞の応力分布を評価し、大出力運転時に加速空洞が安定した稼動をするための設計最適化を行う。そして、季節変化等に伴う冷却水の温度変化や温度管理に関する検討を行い、安定した稼動を維持する上での諸条件を検討する。

空洞発熱、応力歪み等の数値解析では有限要素法による汎用熱・構造解析コードを使用する。当コードを用いた解析は数多く施設での設計で報告されており十分に実績があることが知られている [56][57]。

3.4.1 定常運転時の応力歪みに関する検討

空洞運転時の熱応力歪みに関する検討を行う。第一ステップとして有限要素法による解析の境界条件となるパラメータを決定する。空洞の冷却水の流量、熱伝達率等は表計算により概略的に行い、空洞の大電力運転時の壁損失分布は 2 次元高周波解析コード Superfish による解析結果を用いる。これらを境界条件として ANSYS[58] による熱・構造連成解析を行う。ANSYS では熱解析、構造解析の連成解析を行った。

(a) 解析モデル

図 3.28 に模擬した空洞の計算モデルを示す。1/2 セルモデルで空洞を模擬する。モデル作成の際は次節で述べる Superfish との連携を円滑に行うため、ANSYS で定義する各ノード点に関して、Superfish で設定した segment 境界点と一致する様に設定しておくが良い。

(b) 空洞壁損失の検討

空洞壁損失は 2 次元高周波解析コード Superfish を用いて評価する。Superfish による計算モデルを図 3.29 に示す。壁損失分布のコンタ図を図 3.30 に示す。空洞定常運転時にはノーズコーン支持部での発熱が大きく、最大 $8\text{W}/\text{cm}^2$ 程度の発熱が発生する。

3. 大出力電子線加速器 CWマイクロトロンの500MHzRFシステムの開発

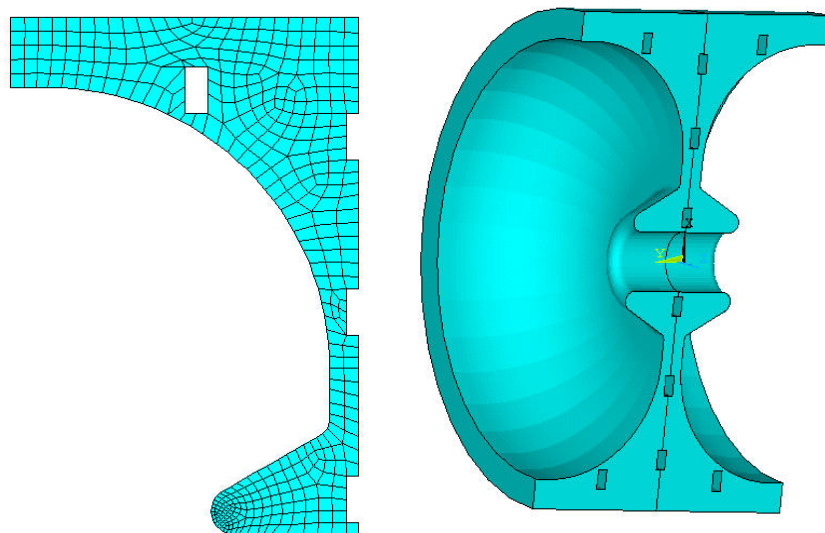


図 3.28: 熱・構造解析モデル (1/2 セル空洞モデル)

3.4 空洞の熱・構造的特性の設計

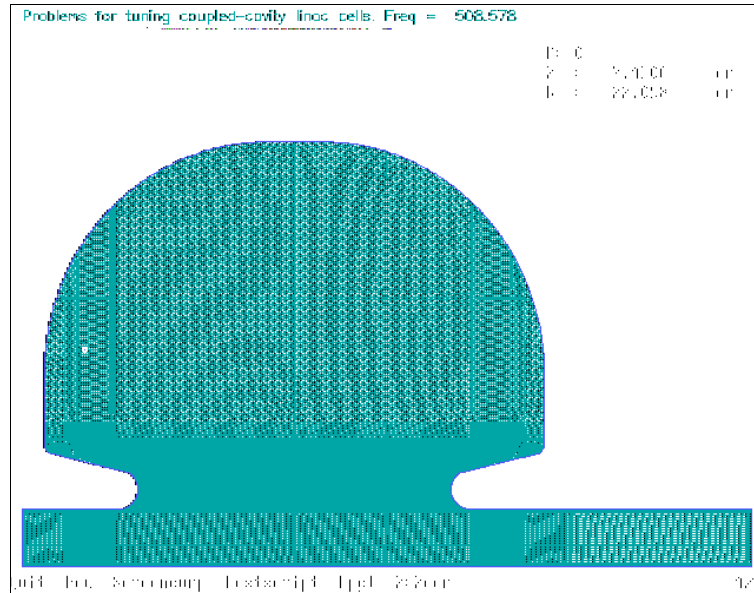


図 3.29: Superfish による 2次元解析モデル

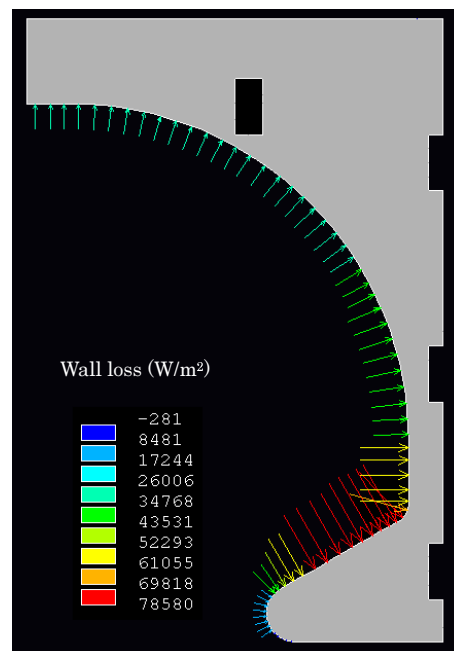


図 3.30: 空洞壁損失コンタ図

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

(c) 空洞冷却水流量、熱伝達係数等の検討

冷却水流量

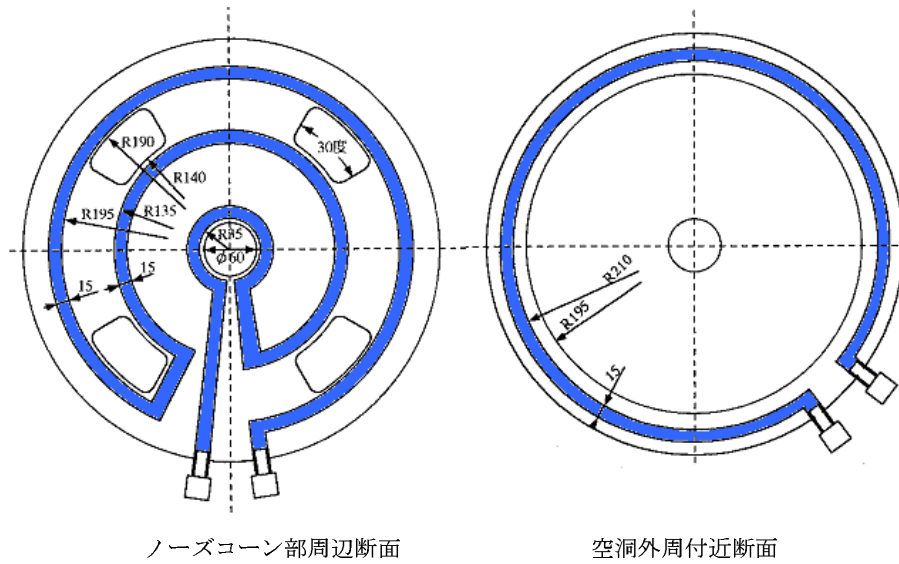
放射光施設 Spring-8 の空洞における熱・構造解析の値 [50] を参考とする。両空洞の形状パラメータ、壁損失等の比較を表 3.10 に示す。

Spring-8 (以降 SP-8) 空洞の場合セル当りの冷却水流量は 50l/min で与えられている。空洞の壁損失は SP-8 と比較して当空洞の場合 40 % 程度であり、流量も上記値を参考にするならば同様に 40 % 程度の流量で十分であるが、冷却効率をより高める為にここでは余裕を持って SP-8 と同一流量とする。冷却配管の配置は図 3.31 に示す構成とする。

表 3.10: 両空洞の形状パラメータ、壁損失の比較

条件	Spring-8	CW マイクロトロン
RF 周波数 (MHz)	508.58	500
セル長 (mm)	294.74	294.73
セル外径 (mm)	492	481.95
ダクト径 (mm)	80	65
セル辺り壁損失 (kW)	50	20

3.4 空洞の熱・構造的特性の設計



ノズコーン部周辺断面

空洞外周付近断面

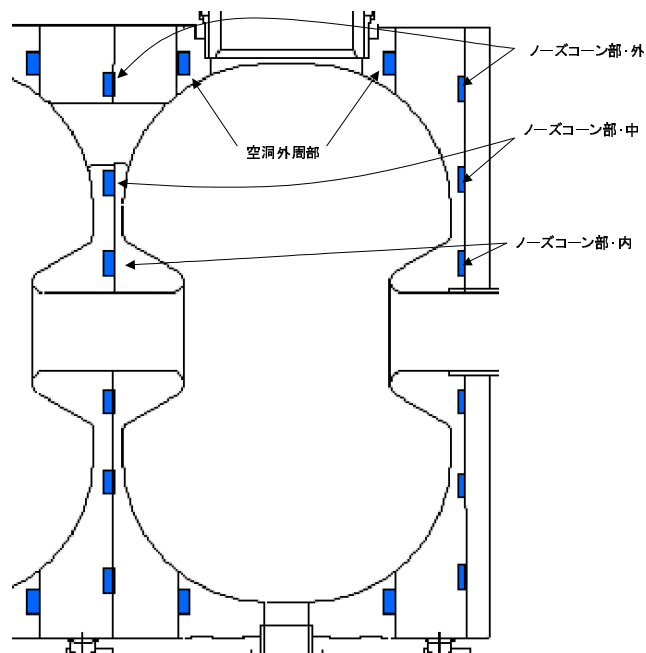


図 3.31: 加速空洞の冷却配管構成

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

熱伝達率

次に、配管の冷却能力を示す値となる熱伝達率の見積る。熱伝達率計算の際必要となる値は冷却配管の相当直径、および冷却水の平均流速、熱伝達特性を表す各種パラメータであり、教科書等 [59] によると (3.4) ~ (3.7) 式で表される。

$$\text{平均直径} \quad de = \frac{4A}{U} \quad (3.3)$$

$$\text{平均流速} \quad \nu = \frac{M}{\pi(\frac{de}{2})^2} \quad (3.4)$$

$$Re \text{ 数} \quad Re = \frac{\nu de}{\nu} \quad (3.5)$$

$$Nu \text{ 数} \quad Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (3.6)$$

$$\text{熱伝達率} \quad h = Nu \frac{\lambda}{de} \quad (3.7)$$

A : 配管の断面積, U : 配管の周長, M : 冷却水流量 (l/min)
 $= 0.86 \times 10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$ (水の動粘性係数), $Pr = 5.85$ (水の Pr 数)
 $= 0.61(\text{W}/\text{m}/\text{K})$ (水の熱伝導率)

以上より得た各種パラメータを表 3.11 に示す。

表 3.11: 冷却配管の各種パラメータ

de	13.3 mm
ν	1.98 m/s
Re 数	30844
Nu 数	181.9
h	8323.7 W/m ² /K

各冷却配管における冷却水温度分布

各冷却チャネルでの温度分布を検討する。従来の冷却配管出入口での温度上昇の評価は図 3.32 に示した様な空洞全体をバルクとみなし、冷却配管も 1 経路として、空洞全体の冷却水の温度上昇を計算し、それをもとに各チャネルでの平均水温を導出する手法が多用されている [60]。

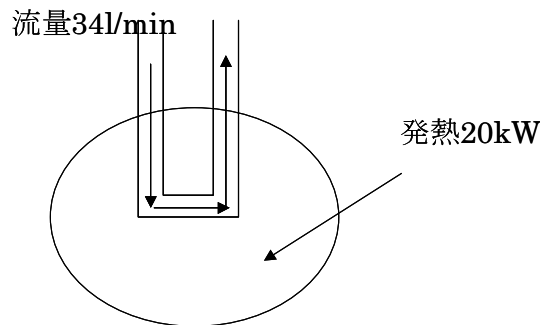


図 3.32: 冷却水温度上昇の概略計算

本空洞の場合、図 3.31 に記載した冷却管構造であり、空洞の発熱分布は図 3.30 に示す通りノーズコーン周辺に顕著に分布し、除熱への寄与は冷却管位置に依存する。ここではより正確な冷却水の温度上昇を見るために、図 3.33 に示す様に各配管の除熱寄与を適当な領域で分割し、それぞれに関して温度上昇を計算した。流量を Q (l/min)、RF による損失を W (kW) とした場合、水温上昇 T () は以下の (3.8) 式で表される。

$$\Delta T = 14.3 \frac{W}{Q} \quad (3.8)$$

各チャネル位置での平均温度上昇の計算結果を表 3.12 に示す。

表 3.12: 領域分割、従来の計算法を用いた各冷却チャネル位置での平均温度

分割	空洞発熱 (kW)	領域分割計算	T ()
① ノーズコーン部内	1.64	1	
② ノーズコーン部中	2.43	2.9	
③ ノーズコーン部外	2.18	4.8	
④ 空洞外周部	3.74	2.9	

(d) 放熱、輻射の検討

自然対流、輻射による空洞表面からの放熱の考慮は文献 [61] に記載されている温度差と熱流束の関係を用いる。図 3.34 に「空洞 - 物体での温度差 VS 熱流束」の関係を示

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

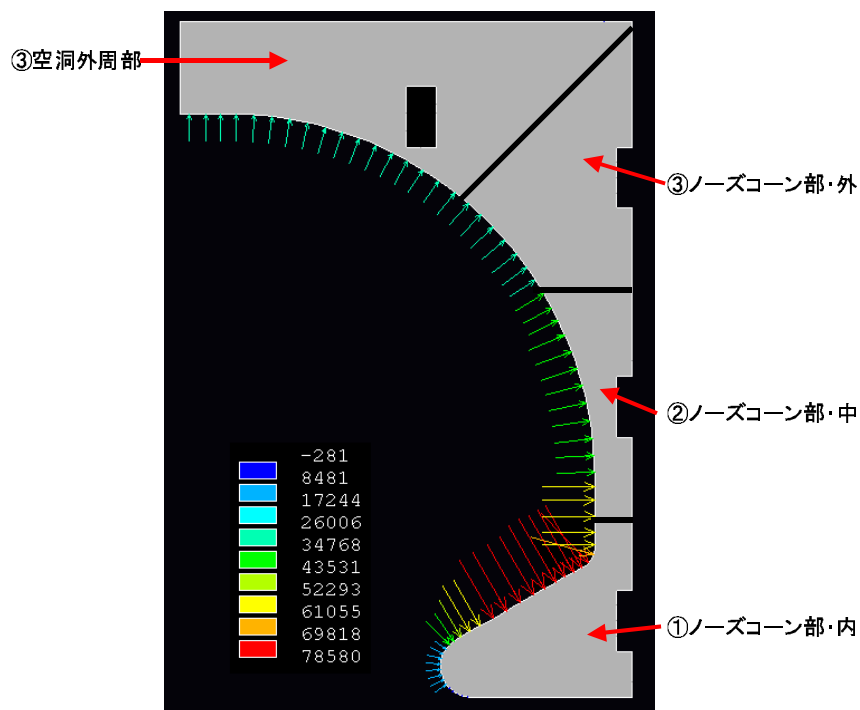


図 3.33: 水温上昇計算での空洞の領域分割

す。空洞は無酸素銅で構成されているので、大気圧空気中の放射率 = 0.87 の特性曲線から熱流束を求める。空洞表面の平均温度は、後述する ANSYS による解析結果から 43 求める。ここで先ず、大気への放熱、および輻射が非考慮な状態で ANSYS より空洞表面での平均温度を求める。次に得られた空洞表面平均温度と大気との温度差より熱流束を読み取り、これを空洞の放熱および輻射を考慮した際の熱流束とする。今回の空洞解析での熱流束は 281 W/m^2 を得た。

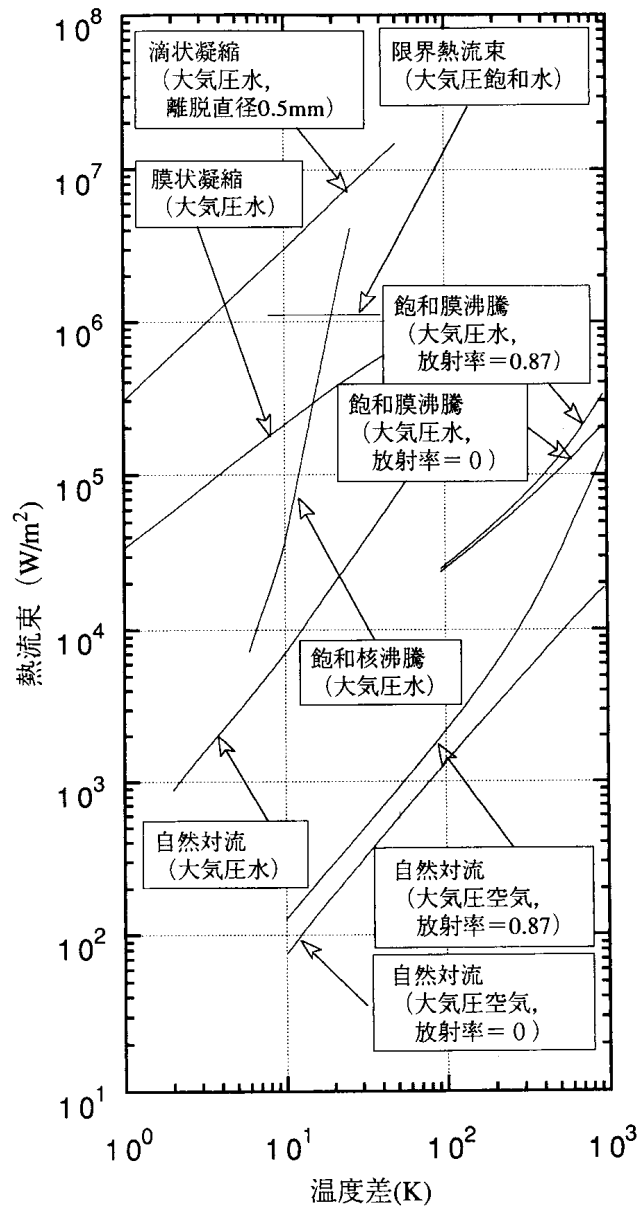


図 3.34: 空洞 - 物体での温度差 VS 熱流束の関係 ([61] より引用)

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

(e) 熱・構造連成解析

解析に用いた境界条件、物性値等の諸条件を表 3.13 にまとめる。r 方向、および z 方向について各セグメントでの歪みを図 3.35 に示す。尚、各セグメントは図 3.36 に示した点を接点した領域である。r 方向、z 方向ともに、最大 90 ミクロン程度の歪みが生じる結果を得た。尚、ここではセグメント # 26 の r 方向を固定とする境界条件を与えている。また空洞内での温度分布を図 3.37 に示す。空洞内で最も発熱する部分はノーズコーン先端部で約 60 に達する結果を得ている。また空洞表面温度も 40 ~ 50 程度まで上昇する結果を得た。

表 3.13: 解析に用いた境界条件および物性値

項目	物性値
銅ヤング率 (N/m ²)	1.298 × 10 ¹¹
銅ポアソン比	0.33
銅熱伝導率 (W/m/)	398
銅線膨張率 (/)	1.66 × 10 ⁻⁵
熱伝達率 (W/m ² /)	8323
室内温度 ()	25
冷却水入口温度 ()	30
Slot 側チャンネル内側水温 ()	30.7
Slot 側チャンネル中側水温 ()	32.4
Slot 側チャンネル外側水温 ()	34.4
空洞外周側チャンネル水温 ()	31.6

3.4 空洞の熱・構造的特性の設計

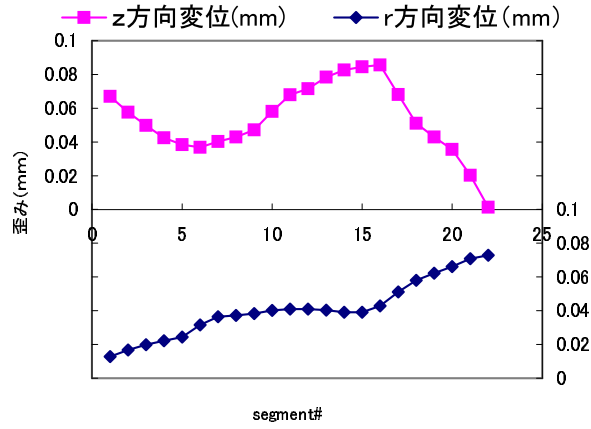


図 3.35: 各セグメントにおける r、z 方向の歪み量

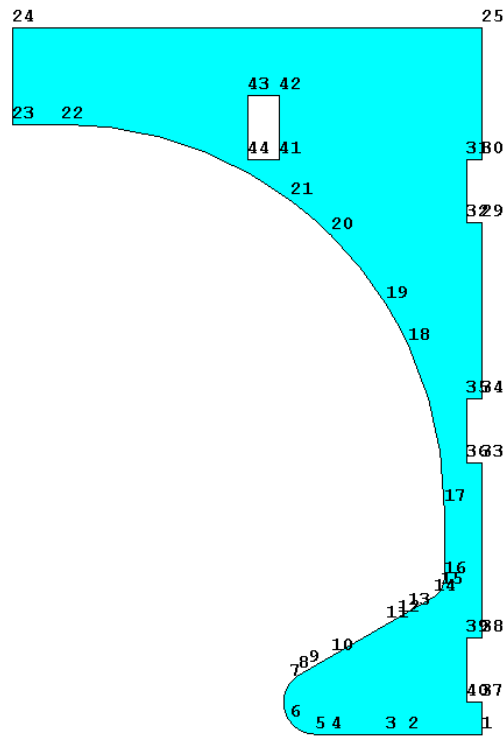


図 3.36: 各セグメント位置

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

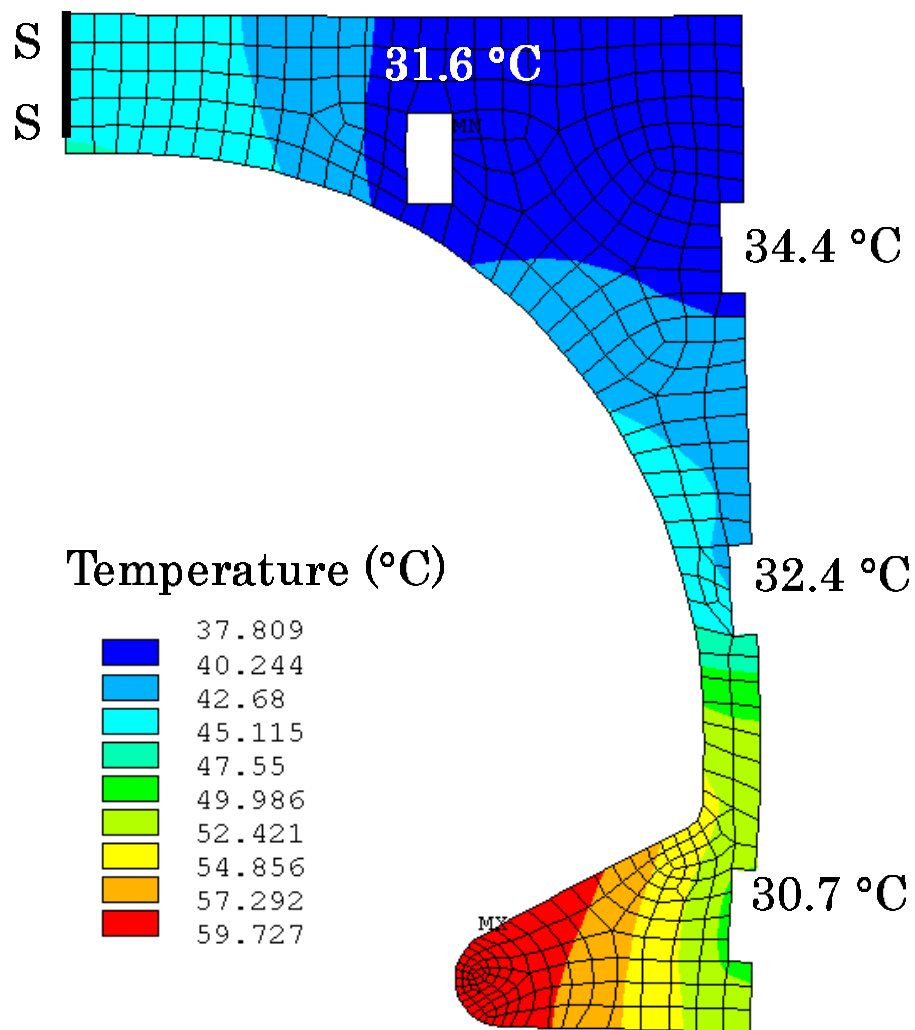


図 3.37: 空洞温度分布

3.4.2 空洞歪みに伴う共振周波数シフト、応力分布の検討

(a) 共振周波数シフトの検討

ANSYS による熱・構造解析から得られた空洞歪み、Superfish から得られた歪み - 共振周波数シフト感度係数を用いて、周波数シフトを定量的に見積。図 3.38 に空洞歪み解析も含めた、全体の計算フローを示す。前節で示した各 segment での変位と superfish で出力される、表 3.14 に示す各 segment の変位に対する周波数シフトの感度係数から、パワー投入前から定常運転時において空洞共振周波数シフトを計算した結果-129kHz と なる結果を得た。

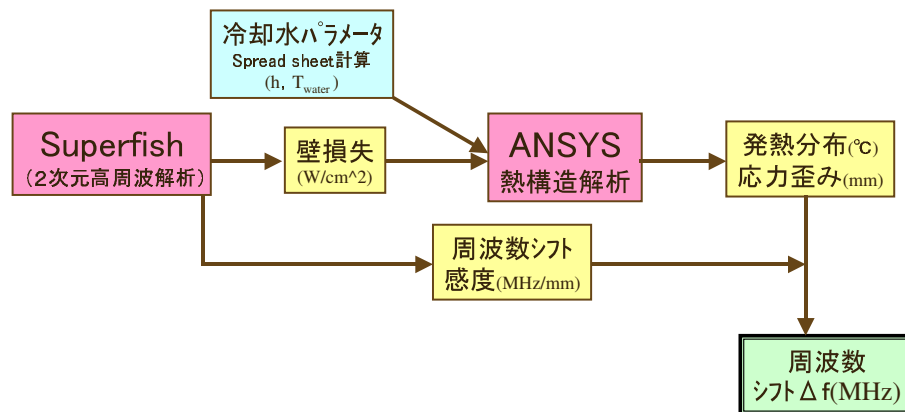


図 3.38: 空洞周波数シフト計算のフロー

(b) 応力分布の検討

空洞歪みが生じた際の空洞に掛かる応力分布に関する検討を行う。空洞の相当応力 (Von Mises stress) を ANSYS により評価し、空洞が熱応力により、塑性変形をしない事を確認する。無酸素銅の降伏応力は文献 [63] では 55MPa で与えられている。本検討では、この値を降伏応力として採用する¹。空洞の相当応力の最大値を 55MPa 以下に抑えることを目標に設計必要がある。よって、応力が最も集中するノーズコーン根元

¹実際の降伏応力は加工時の状況によって降伏点は大きく左右する。機械工学便覧等の教科書では 60 ~ 200MPa と降伏応力は加工時の状況に応じて差がある。ここでは安全側評価のために文献、教科書の中で最も小さな値であった 55 MPa を降伏応力として採用する。

3. 大出力電子線加速器 CWマイクロトロンの500MHzRFシステムの開発

表 3.14: 周波数シフトの感度係数

segment	dF/dR (MHz/mm)	dF/dZ (MHz/mm)
1	6.57E-05	0.00E+00
2	1.23E-04	0.00E+00
3	3.14E-03	0.00E+00
4	6.32E-03	0.00E+00
5	8.37E-02	5.54E-02
6	0.00E+00	7.22E-01
7	1.48E-01	1.27E-01
8	9.62E-02	5.55E-02
9	1.11E-01	6.43E-02
10	6.63E-02	3.83E-02
11	-8.63E-03	-4.99E-03
12	-1.38E-02	-7.95E-03
13	-4.71E-02	-2.72E-02
14	-1.51E-02	-1.49E-02
15	-6.04E-03	-2.16E-02
16	-1.12E-07	-1.27E-01
17	-6.59E-02	-2.88E-01
18	-4.73E-02	-8.75E-02
19	-1.25E-01	-1.56E-01
20	-9.85E-02	-8.52E-02
21	-6.18E-01	-2.02E-01
22	-1.38E-01	0.00E+00

部分の応力を低減させるためにノーズコーンに近接する冷却配管位置の最適化を行った。図 3.39 に得られた冷却配管位置と相当応力最大値の関係を示す。相当応力は、31 ~ 38MPa で変化する。何れの場合も目標値 55MPa より下回ることが確認出来るが、ここでは相当応力が最小値となる配管位置とした。得られた相当応力のコンタ図を図 3.40 に示す。相当応力は最大でもノーズコーン根元付近の約 31MPa (降伏応力の 60%程度) であり、空洞の塑性変形、破損等はの危険性は十分抑えた設計となっていると考える。

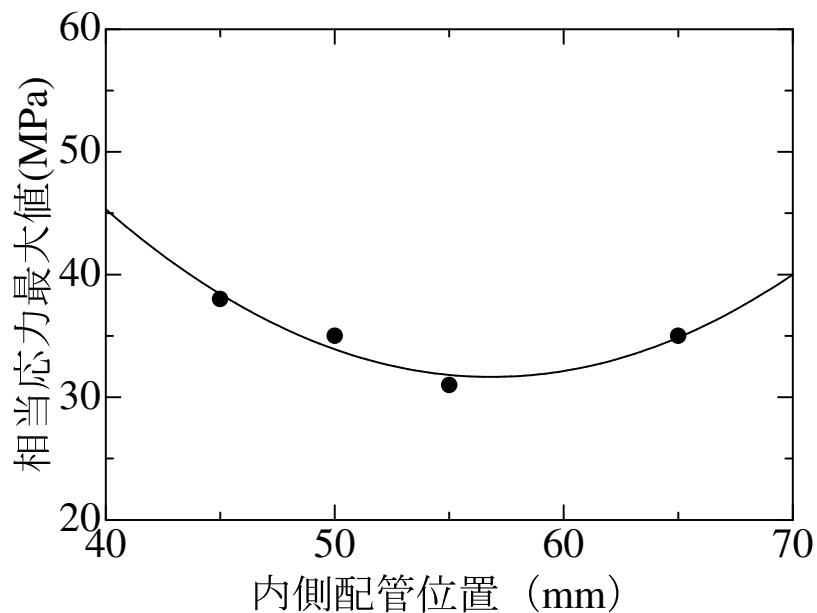


図 3.39: 内側冷却配管位置と相当応力最大値の関係

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

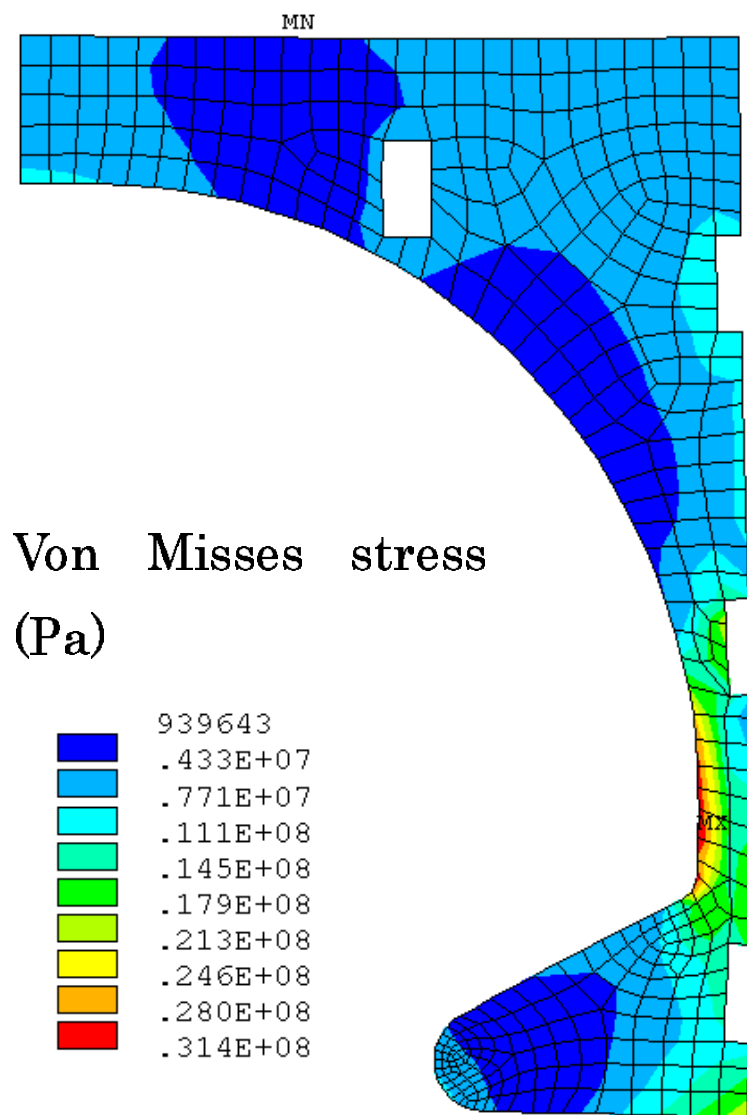


図 3.40: 相当応力コンタ図

3.4.3 冷却水、大気の温度管理

冷却水、室温の温度管理について検討する。ANSYS を用いた感度解析で、各設定温度での周波数シフトの変動を見積る。冷却水温度の変動が空洞共振周波数に及ぼす影響は、冷却水入口温度を 20 ~ 42 と変化させ、周波数シフトの変動を見積った。尚、室温は 25 で一定とする。結果を表 3.15 に示す。大気の温度変化に対する影響も同様に見積もる。冷却水入口温度 30 で固定し、室温を 5 ~ 30 で変化させた際の周波数シフトの変動をそれぞれ見積った。結果を表 3.16 に示す。

以上より、図 3.41 に示す通り、水温変化による周波数シフトの変動感度は $-7\text{kHz}/$ であり、室温変化による周波数シフトの変動感度は $-0.1\text{ kHz}/$ である結果を得た。

表 3.15: 各ケースでの空洞の周波数シフト (室温 25 時の空洞形状基準)

冷却水入口温度 ()	周波数シフト (kHz)	f (kHz)
20	-58.2	70.8
30	-129	0
42	-213.9	-84.9

表 3.16: 季節による室温変動 (5 ~ 30) に伴う周波数変動

室温 ()	周波数シフト (kHz)	f (kHz)
5	-127	2
10	-127.5	1.5
20	-128.5	0.5
25	-129	0
30	-130.5	-0.5

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

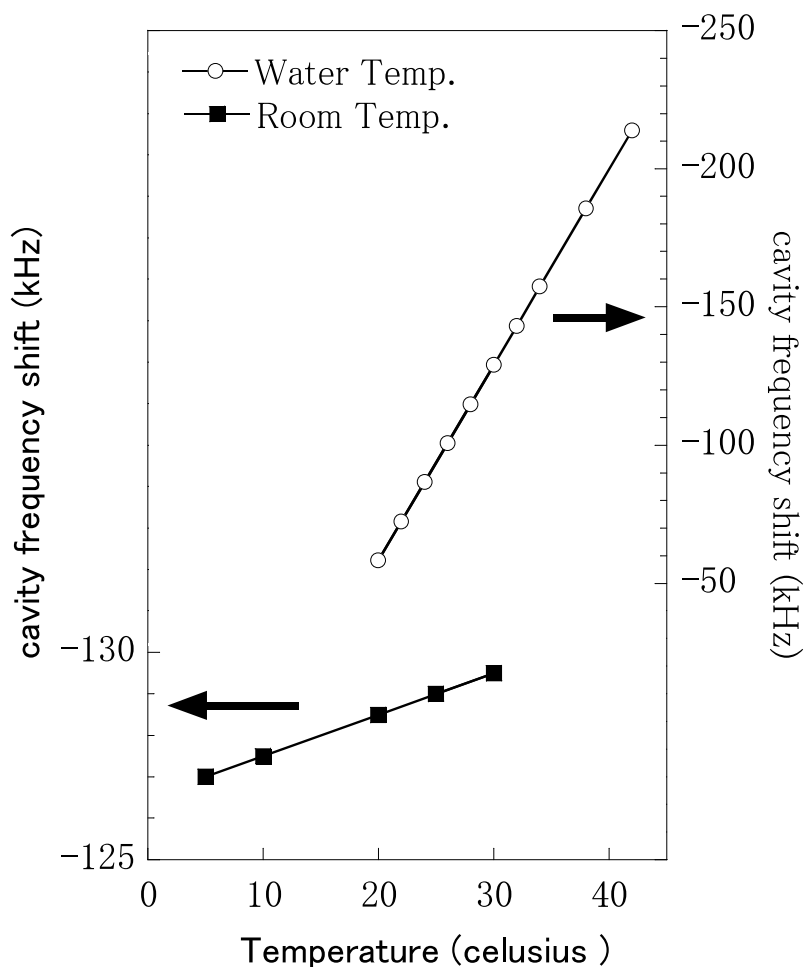


図 3.41: 冷却水温度、および大気温度と空洞周波数シフト変動の関係 (但し、冷却水温度変動時は大気温度 25 で一定。大気温度変動時は冷却水 30 で一定であると仮定)

3.4.4 真空下での空洞歪み、周波数シフトの検討

真空引きの際の大気圧による空洞へ応力歪みの影響を検討する。端板を計算体系に加えた空洞端部 1/2 セルモデルを作成し、空洞端板、外周面に 1 気圧 (1.013 MPa) を境界条件として入力した場合、しない場合について空洞歪みを比較した。計算モデルを図 3.42 に示す。両ケースの比較により、ひずみ、周波数シフトの検討を行う。結果を表 3.17 に示す。

表 3.17: 真空引きによる空洞歪み、共振周波数シフト、および相当応力最大値

項目	結果
r 方向歪み最大値 (ミクロン)	0.5
z 方向歪み最大値 (ミクロン)	5
共振周波数シフト (kHz)	6

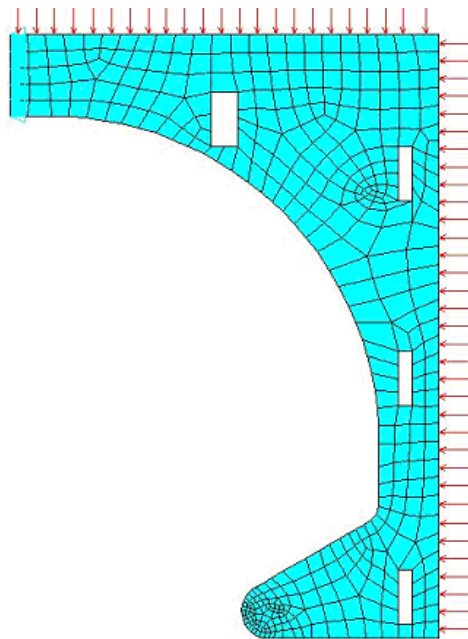


図 3.42: 真空引き時の空洞表面の大気圧を考慮に入れた空洞計算モデル

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

3.4.5 冷却配管の圧力損失の検討

空洞冷却配管で生じる圧力損失について検討する。圧力損失の主な成分である、(a) 摩擦損失、(b) 屈曲損失、(c) 径拡大・収縮による損失、(d) 分岐配管による損失に関する検討を行う。

(a) 配管 - 冷却水間の摩擦損失

断面を円管とし、経路を直管とする配管の場合、摩擦損失は (3.9) 式に示す簡易式によって表され、 λ は流体の管摩擦係数 $2000j\text{Re}j10^5$ では次の (3.10) 式が一般に用いられる。

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{de} \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.9)$$

$$\lambda = \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}} \quad (3.10)$$

管摩擦係数 : 0.026、密度 : 997.07kg/m³ (水温 30)

経路 1 : ノーズコーン部で 2700mm、空洞部で 1400mm (図 3.31)

それぞれの配管経路を直管で近似すると摩擦損失 P はそれぞれ以下の通りとなる。

$$\Delta p_{Slot, \text{摩擦}} = 0.048 \text{ kg/cm}^2, \Delta p_{Cavity, \text{摩擦}} = 0.025 \text{ kg/cm}^2$$

(b) 配管屈曲による水流方向変化による損失

経路が屈曲する部分に関しては、(3.11)、(3.12) 式に示すエルボ部分の損失の式を適用する。これらの式の適用条件は内壁がなめらかな円管であるので、ここでも前節と同様に円管として近似する。

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.11)$$

$$\zeta = 0.946 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) + 2.047 \sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3.12)$$

これよりエルボ損失係数 ζ は 0.985 となる。また屈曲回数は両場合ではノーズコーン部、空洞外周部でそれぞれ、6 箇所、2 箇所であるので、摩擦損失 Δp はそれぞれ以下の通りとなる。

3.4 空洞の熱・構造的特性の設計

$$\Delta p_{Slot, \text{摩擦}} = 0.055 \text{ kg/cm}^2, \Delta p_{Cavity, \text{摩擦}} = 0.018 \text{ kg/cm}^2$$

(c) 径収縮・拡大による損失

空洞冷却配管継ぎ手から空洞冷却チャネルに接続される箇所では管の径は 10mm から 13.3mm へと拡大し、図 3.43 に示すような、径拡大による圧力損失が発生する。径が拡大する際の圧力損失は (3.13)、(3.14) 式にて表される。

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho v_1^2}{2} \quad (3.13)$$

$$\zeta = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad (3.14)$$

A_1 : 径拡大前断面積、 A_2 : 径拡大後断面積、 v_1 : 径拡大前の流速
よって以下の圧力損失が発生する。

$$\Delta p = 0.0018 \text{ kg/cm}^2$$

尚、流速は拡大前のチューブ内での値である。

同様に冷却配管から空洞入口での継ぎ手箇所では管の径は 13.3mm から 10mm へと縮小し、径縮小による圧力損失が発生する。径が縮小する際の圧力損失は (3.15) 式にて表される。

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho v_2^2}{2} \quad (3.15)$$

v_2 : 径縮小後の流速

文献 [61] より、損失係数は以下の表 3.18 の通りである。

表 3.18: 径縮小の損失係数

A_2/A_1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
c_c	0.61	0.62	0.63	0.65	0.67	0.70	0.73	0.77	0.84	1.00
ζ	0.41	0.38	0.34	0.29	0.24	0.18	0.14	0.089	0.036	0

よって以下の圧力損失が発生する。

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

$$\Delta p = 0.0041 \text{ kg/cm}^2$$

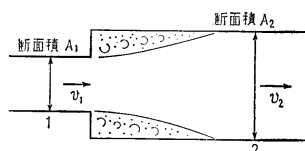


図 3.43: 径拡大時の圧力損失 ([60] から引用)

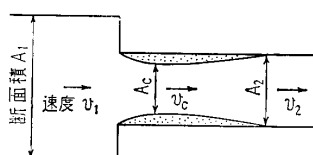


図 3.44: 径縮小時の圧力損失 ([60] から引用)

(d) 分岐配管による圧力損失

冷却装置から空洞への接続は、主管から並列分岐する接続方式としている。並列配管での損失は図 3.45 に示す圧力損失が発生し、(3.16)、(3.17) 式に示す通りとなる。

$$p_i - p_e = k_d \frac{1}{2} \rho V_i^2 \quad (3.16)$$

$$p_e - p_o = k_c \frac{1}{2} \rho V_o^2 \quad (3.17)$$

主管圧力 末端 : p_e , 入口 : p_i , 出口 : p_o

流速 入口 : V_i , 出口 : V_o

寸法 主管長 : L, 主管径 : D

$$k_d = \frac{\lambda L}{3D} - 1, k_c = \frac{\lambda L}{3D} + 2$$

主管寸法を $L = 1000 \text{ mm}$ 、 $D = 100 \text{ mm}$ とし、流量を 200 l/min とした場合、主管 - 股管への分岐、集合の圧力差は、 0.0009 kg/cm^2 、 0.0018 kg/cm^2 となり、空洞配管による圧力損失と比較すると僅か数%程度の大きさであり、無視しても良い結果を得た。

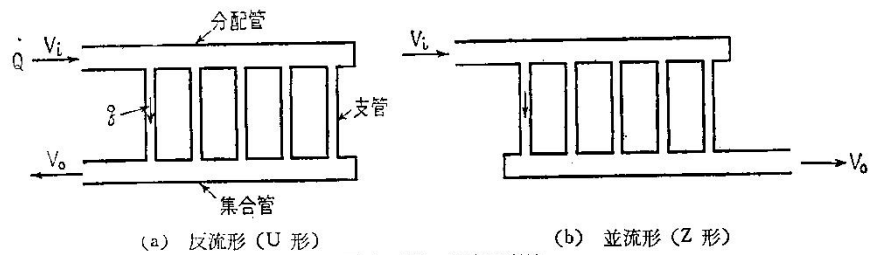


図 4・122 管寄せ配管

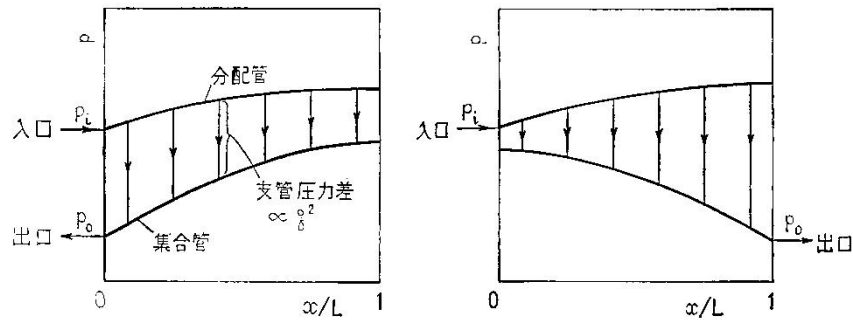


図 3.45: 並列配管での圧力損失の傾向 ([60] から引用)

(e) 半経験公式との比較

上記で検討した圧力損失結果検証のためのクロスチェックを行う。文献 [62] に記載の半経験公式を用いてノーズコーン側、空洞外周側の冷却チャネルの圧力損失を見積もり前節の結果と比較検証した。半経験公式は以下の (3.18) 式に与えられている。

$$G_w = 1.25 \times 10^{-3} (1 + 0.009 t_w) \cdot \frac{\pi}{4} d_h^{2.71} (\Delta p_w / N \cdot l)^{0.57} \quad (3.18)$$

ここで

$$t_w \simeq 30$$

d_h : 冷却孔の半径 (mm)

Δp_w : 必要な圧力損失 (kg/cm^2)

Nl : コイルの全長 (m)

(3.18) 式左辺の G_w の単位は l/sec である。ノーズコーン側、空洞外周側チャネル各々での圧力損失の各寸法はそれぞれ下記の通り。

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

ノーズコーン側 : $d_h=13.3(\text{mm})$ 、 $G_w=11.3 (\text{l/min}) =0.05667(\text{l/sec})$ 、 $Nl=2.7 (\text{m})$

空洞外周側 : $d_h=13.3(\text{mm})$ 、 $G_w=11.3 (\text{l/min}) =0.05667(\text{l/sec})$ 、 $Nl=1.4 (\text{m})$

よって (3.16) 式から得られる圧力損失は以下の結果を得る。

$$\Delta p_{wSlot} = 0.1092 \text{kg/cm}^2, \Delta p_{wCavity} = 0.0494 \text{kg/cm}^2$$

一方、前節検討でのノーズコーン側、空洞外周側チャンネルの圧力損失は；

ノーズコーン側 : $0.1015 (\text{kg/cm}^2)$, 空洞外周側 : $0.0324 (\text{kg/cm}^2)$

であり、表 3.19 に示す通り両計算結果は 10%以内の範囲で良好に一致していることが確認出来る。尚、(3.18) 式の精度は実測値の比較から 10 ~ 20 %程度であると文献に記載されている。以上より、当検討結果は十分に信頼できる値だと言える。

表 3.19: 文献 [62] の半経験式と前節の検討結果の比較

	ノーズコーン側冷却配管	空洞外周側冷却配管
半経験式 (kg/cm^2)	0.1092	0.0494
当検討結果 (kg/cm^2)	0.1015	0.0324

以上の結果から、空洞、カプラ、チューナ、および伝送経路である同軸管等含めた RF 空洞全体での冷却水流量、圧力損失等をまとめたものを表 3.20 に示す。

表 3.20: 空洞圧力損失まとめ

	壁損失 (kW)	流量 (l/min)	流速 (m/s)	圧力損失 (kg/cm^2)	水温 T ()	配管長 (m)
空洞 2 セル	40	100	1.99	2.18	5.6	
カプラ本体	0.1	6	1.27	0.1	0.2	1
カプラポート	~0.1	10	2.12	0.12	0.1	0.5
チューナ本体	0.8	5	1.06	0.07	2.3	1
チューナポート	0.1	3	0.64	0.01	0.5	0.5
同軸管	0.2	2	0.42	0.03	1.4	2
合計	41.4	134	-	2.6	-	-

3.4.6 熱・構造設計まとめ

本熱構造設計における結果を以下にまとめる。

・セル当り冷却水流量	50l/min
・空洞応力歪み最大値	r : 71 μ m、z : 67 μ m
・空洞共振周波数シフト	-129kHz
・空洞相当応力最大値	31MPa
・気温、水温変化による周波数シフト	気温 : 0.1 kHz/、水温 : 7 kHz/
・真空引きによる歪み	r : 5 μ m、z : 0.5 μ m
・空洞表面温度	35 ~ 45
・空洞内温度最大値	60
・全冷却水流量	134 l/min
・全圧力損失	2.6 kg/m ²
・冷却水温度上昇	最大 5.6

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

3.5 加速空洞の製作

3.5.1 全体構造

RF 空洞の概略図を図 3.46 に示す。空洞は 2 連セルで構成される。一方のセル上部に入力カプラが取付けられ、RF 電源 (IOT 管) からの高周波電力が同軸管 WX-152D、および入力カプラを経て空洞に入力される。各セルの側面には、駆動チューナ、モニター用ピックアップ、および真空ゲージポートがあり、真空排気ポートはもう一方のセル下部に設けてある。またカプラ側セル下部には内部観察用の窓を設置する。冷却水路は空洞端部、ノーズコーン部分、空洞の周囲 (以下、外周と称す)、チューナ、カプラポートの周囲に設けている。また、入力カプラ、チューナ本体も冷却水により冷却する。冷却水の流量は空洞 1 セル当たり 50l/min とし、全体で 134l/min とする。前節の熱構造解析から、空洞の発熱による形状変化により空洞共振周波数は約-130kHz 程度変動する解析結果を得ている。

また、空洞を製作する際生じる共振周波数の不一致、即ち計算時のメッシュ粗さ等によるモデル不完全さ、および製作時の製作公差による周波数のずれは 2MHz 程度であると予想される [55]。これらを補償する手段として、通常は、空洞完成時の周波数の合わせ込み時に固定チューナ等による粗調整を行い、更に運転中の温度変化による周波数ずれを補償する手段としてフィードバック式の駆動チューナを設ける方式をとる。今回これら 2 段階の周波数合わせ込みを、駆動チューナの試作モデルを作成し、チューナの挿入深さを予め決定し、実機チューナに反映させて製作する方針とし、固定チューナを用いないこととする。

周回 (加速) ビームに対する真空度は特別なものでなくてよく、 10^{-5} Torr 程度の真空度で十分である。空洞の真空系を設計する上で考慮すべき点は、放電と電子銃に与える影響である。放電限界については、真空火花放電に関する論文 [64] によると 10^{-5} Torr 以下では変わらないとある。また、放電限界ぎりぎり設計される RFQ ライナックにしても、 10^{-6} Torr 程度でも問題ない [65]。

一方、電子銃は超高真空 (10^{-11} Torr) が必要で、LBT との境界でビームアパーチャを狭くしているとはいえ、空洞との距離は短いため、空洞の真空度が悪いと、超高真空を達成できない。 1×10^{-6} Torr 以下は必要である。このように必要な真空度 1×10^{-6} Torr 程度であり、真空ポンプは 500l/s 程度のターボポンプで問題なく、加工後の表面処理

も特別なことをする必要はないと考える。

以上、空洞の製作設計を進める上で考慮すべき重要な要素を表 3.21 にまとめる。図 3.47 に装置全体に組み込んだ状態を示す。図 3.48 に空洞の断面図詳細を添付する。

表 3.21: 空洞製作設計上の重要な要素

要素	考慮すべき点
① 機械構造	<ul style="list-style-type: none"> ・ 構造的強度 ・ 寸法精度 ・ 分割リング構造 ・ 表面粗さ（高 Q 値の確保）
② 冷却構造	<ul style="list-style-type: none"> ・ 配管設計（冷却効率） ・ 真空漏れ防止
③ 周波数調整機構	<ul style="list-style-type: none"> ・ 仕上がり誤差 コールドモデルチューナ ・ 運転時の熱膨張変化 駆動チューナ
④ RF 導入部	<ul style="list-style-type: none"> ・ 同軸間による大電力入力（WX-152D） ・ 発熱除去 ・ RF コンタクト部、同軸度等の寸法精度

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

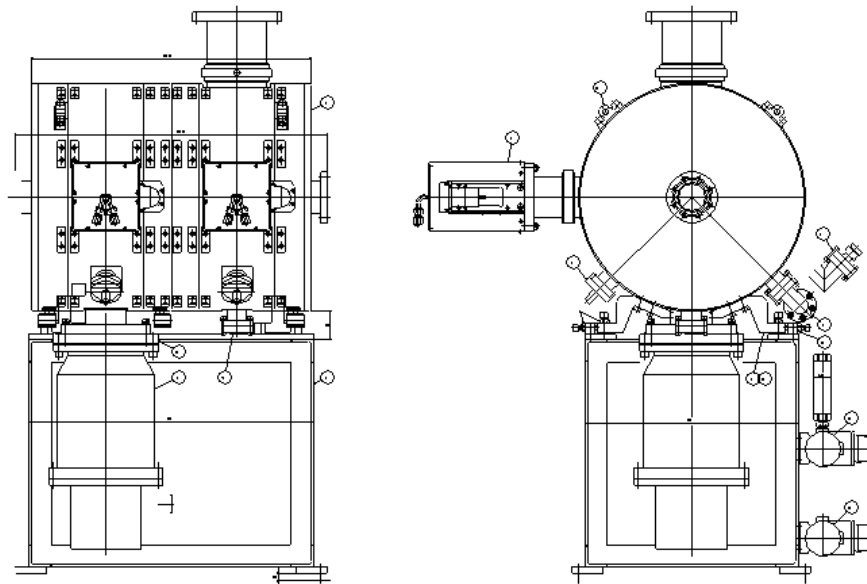


図 3.46: 加速空洞外形図

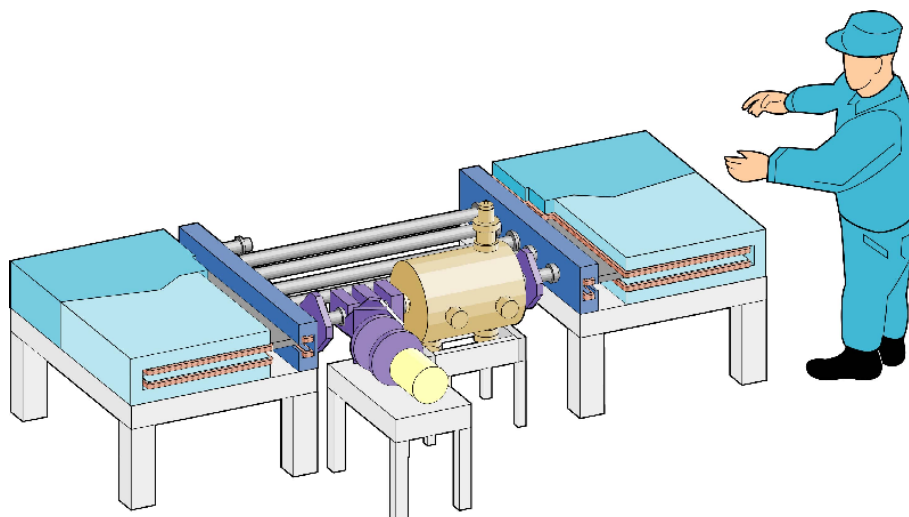


図 3.47: CW 加速器装置全体図

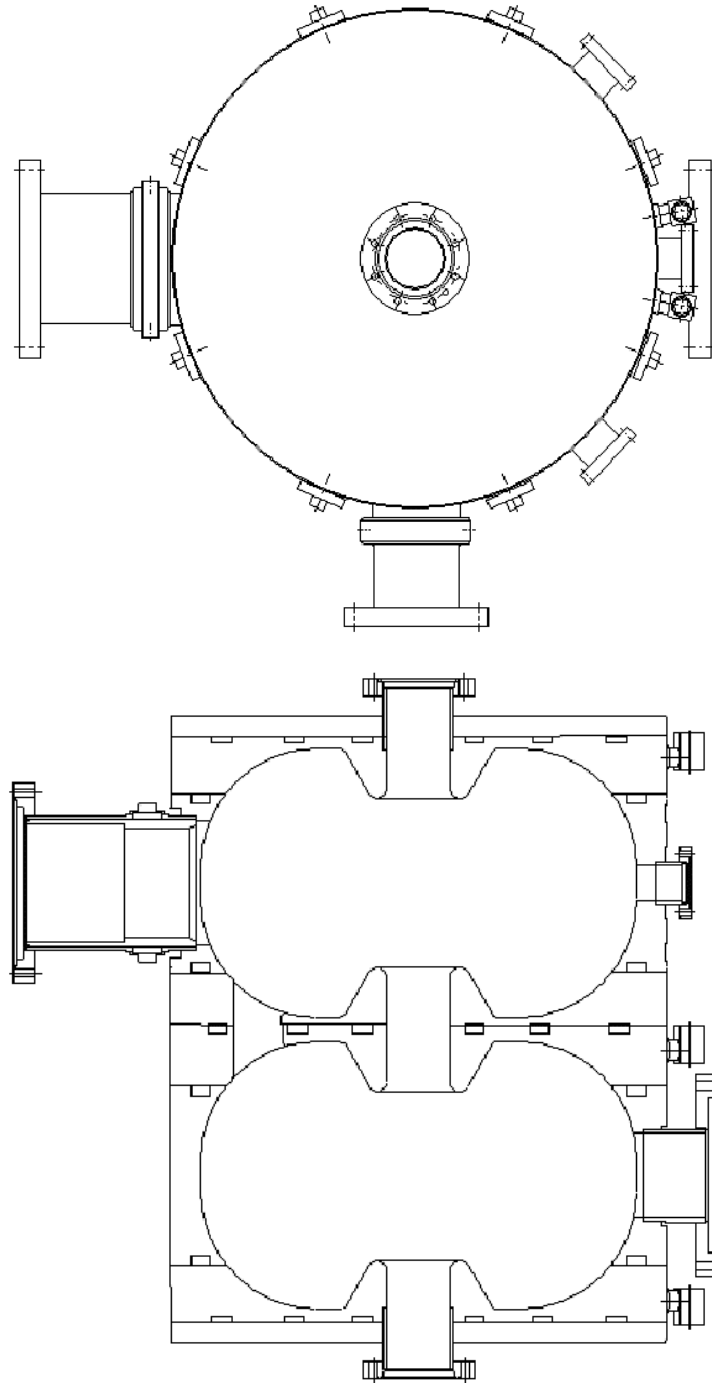


図 3.48: 空洞チェンバー断面図

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

3.5.2 製作の方針

前節で述べた通り、空洞寸法は解析に基づいて決定した。2次元高周波解析コード Superfish で基本検討し、3次元コード MAFIA を用いて各種ポートやカプリングスロットの寸法を決めた。設計に際して、目標周波数は 500.00MHz とした。考慮した項目は空洞壁損失、共振周波数とセル間結合強度であった。また、各種ポートについては、Q 値への影響と周波数への影響を考慮して決定した。3.6 節にて加工精度の周波数への影響を詳述する。表 3.22 に空洞の代表的寸法仕様を示す。

表 3.22: 加速空洞の代表的寸法仕様

空洞本体寸法	
空洞内径	448.1 mm
空洞内大カーブ半径	120.0 mm
ボア径	65.0 mm
空洞セル内ビーム軸方向壁間距離	270.7 mm
セル中心間距離	294.7 mm
ビームポートフランジ間距離	704.5 mm
空洞外壁両端板間距離	629.5 mm
真空ポート（内径、長さ）	85 mm、110 mm
カプラポート（内径、長さ）	110 mm、186 mm
チューナポート（内径）	73 mm
RF ピックアップポート（内径、長さ）	38 mm、L > 60 mm
真空ゲージポート（内径、長さ）	38 mm、L > 60 mm
カプラ放電監視ポート（内径、長さ）	38 mm、L > 60 mm

冷却チャネルの配置から、図 3.17 に示すように 8 つに分割して加工、ロウ付け方式とした。材質は第一級の無酸素銅（OFHC）を用いた。これは電子管等で用いられる銅で、ガス放出が少なく、真空によい。また、空洞に用いた場合は放電を防ぎやすい。ロウ付けにおいては、亀裂が起きにくいことも挙げられる。前述した KEK-PF[49] や、韓国 POSTECH[66] 等の空洞に広範に使用されている。また、電子ライナック等の様々な空洞において本材料が使用されている。

3.5.3 空洞の製作

(a) 加工

OFHC は 8 分割したそれぞれの最終加工品に近いブロックで日立電線にて購入した。カッターは機械加工用カッターとして、ダイヤモンドカッターと類似のボラゾンカッター [67] を使用し加工を行った。加工精度は $10 \sim 20 \mu\text{m}$ である。全て曲面のため測定はしていないが、共振周波数の測定から期待通りの加工ができたと考える。図 3.49 ~ 3.51 に加工後の空洞中心リングを示す。

表面粗さは 500MHz の銅における RF 表皮深さである $3 \mu\text{m}$ を目標値とした。最終加工後では、空洞内面は全て曲面になるため、表面粗さの測定はできない。そのため、平面加工する端部のパーツを同じ加工方法で加工し、表面粗度計を用いて測定した。図 3.51 は測定の様子を示す。結果は以下の通り、平均粗さは RF 表皮深さ $3 \mu\text{m}$ よりも十分に小さいことを確認した。



図 3.49: カップリングスロット研磨後の空洞リング

(b) ロウ付け

加工した各リングのロウ付けを融点 800 付近のロウ材を用いて実施した。この際、一部のポート部については機械的強度を確保するため、内筒を無酸素銅、外筒を SUS

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発



図 3.50: ノーズコーン部拡大図

表 3.23: 試験加工後の表面粗さ

	Rmax (凹凸の最大値)	Ra (凹凸の平均値)
半径方向	2.2 μ m	0.3 μ m
円周方向	1.6 μ m	0.7 μ m

とした2重ダクト構造で接合しているが、これらは予め融点の高いロウ材を用いて結合し、ロウ材の溶融を防止した。全てのロウ付けにおいて常時水素ガスを流した雰囲気下で実施した。

ロウ付け作業後、ヘリウムリーク検査の結果、空洞全体において、リークがないことを確認した。空洞内面を目視検査し、ロウが若干空洞内面に漏れて付着している箇所が見つかった。使用したロウ材の抵抗率は、銅の約13分の1であり、Q値劣化の原因となることが懸念されるので付着したロウ材をScotchペーパーで研磨し取除いた。

電解研磨等を行わず、アセトンによる洗浄を行い最終的な表面仕上げとした。洗浄前後でQ値測定を行ったが顕著な変化は見られなかった。

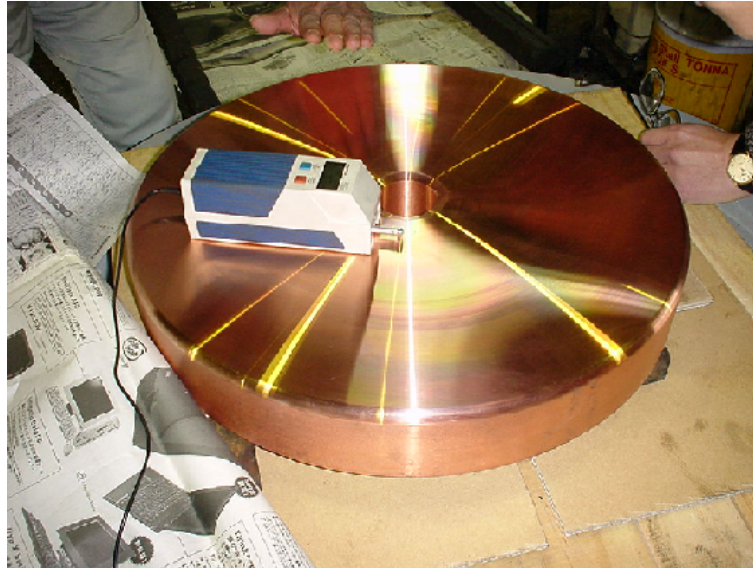


図 3.51: 空洞端部リングでの表面粗さ測定。試験加工後の表面粗さを簡易型測定器で測定。最終加工では全て曲面となり測定できないため、同じ加工方法で平面に加工した物を測定した。



図 3.52: ロウ付け後の空洞。表面の異なる色の光沢は表面に付着したロウ材

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

3.6 加速空洞の高周波特性試験

3.6.1 低電力試験

低電力試験では信号検出用のピックアップループは各セルに装着し、空洞共振周波数、Q 値を測定し、カプラと加速空洞の結合度を最適値に設定した後、各セルの電磁界バランスを調整し、空洞の電解分布を測定した。図 3.53 に測定ブロック図を示す。

試験では、S/N 特性上、比較的大きいループを使用した。試験終了後は 40kW 投入時仕様値である $2.5V_{rms}$ が得られるように小さくした。図 3.54 はチューナであり、図 3.55 は実験中の様子である。

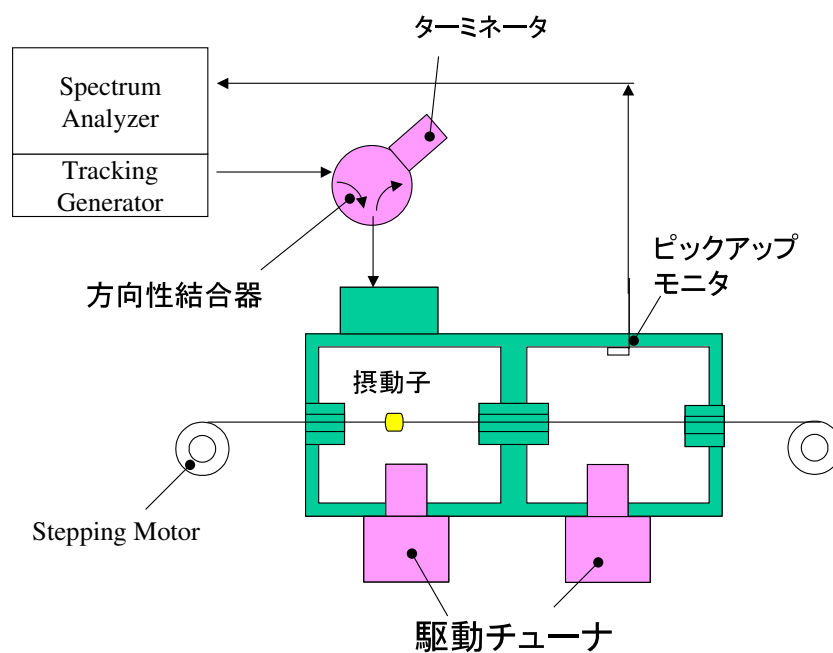


図 3.53: 空洞低電力試験測定システム概略図。振動子および Stepping Motor は場分布測定時のみ使用し、Q 値測定時は使用しない。

3.6 加速空洞の高周波特性試験

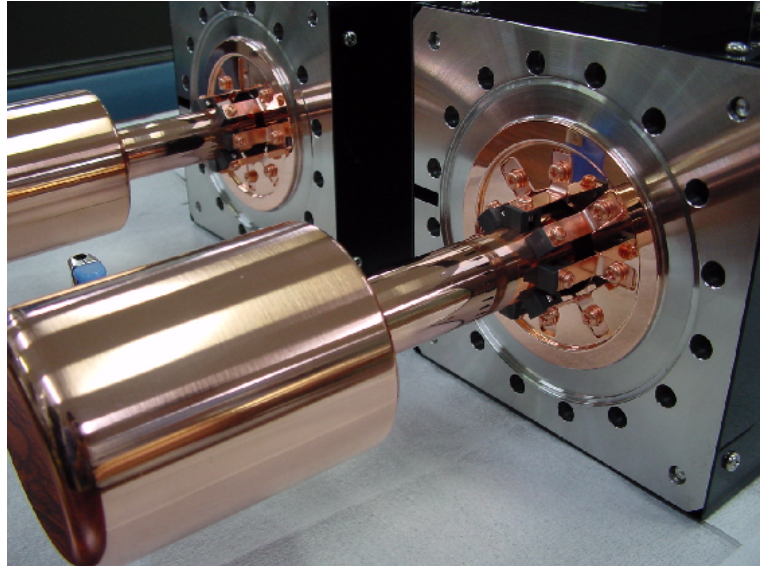


図 3.54: 空洞組み込み前の可動チューナ

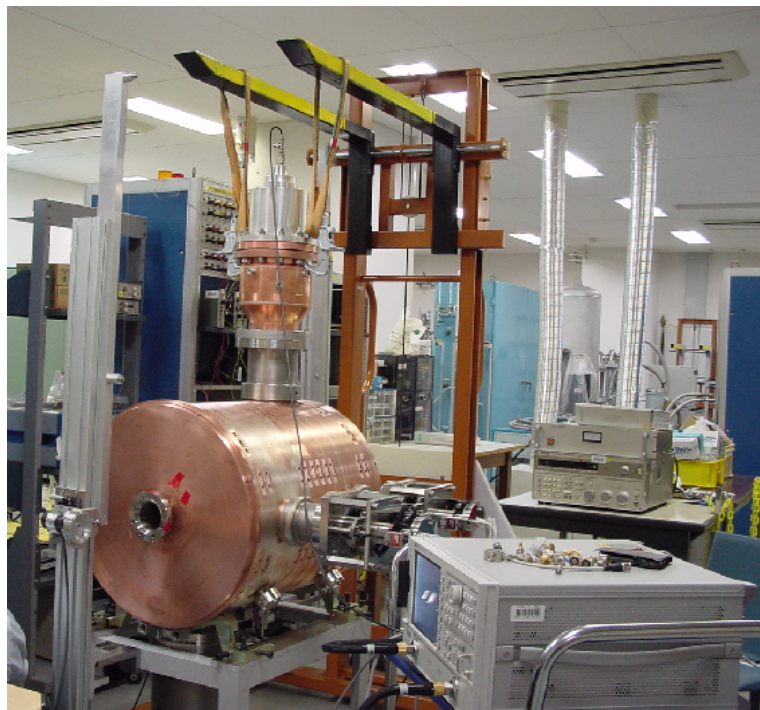


図 3.55: 空洞低電力試験の様子

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

(a) 共振周波数測定

測定結果を表 3.24 に示す。チューナを付けない状態での共振周波数は、空洞の製作許容誤差から予想された範囲内であり、チューナの予想範囲内の挿入量で、500MHz に調整できた。期待通りの機械加工ができたと考える。

表 3.24: 共振周波数測定結果

条件	共振周波数 [MHz]
セラミック窓無しカプラ (チューナ無し)	$f_{\pi}=498.375$
セラミック窓付きカプラ (チューナ無し)	$f_{\pi}=498.031$ $f_{\pi/2}=499.043$
セラミック窓付きカプラ (チューナ調整後)	$f_{\pi}=500.000$ $f_{\pi/2}=500.699402$

また、高調波の測定結果を図 3.56 から図 3.57 に示す。表 3.25 は振幅の比較的大きい高調波 (モードに対して約 10dB 以内の差) についてまとめたもので、MAFIA の解析結果と一緒に示す。それぞれの高調波は、電界分布を測定してモードを確かめたのではなく、解析結果に近い測定値を記載した。また、空洞の Q 値が高いので、500MHz またはその 1.5 倍、2 倍等から充分離れているものについては省略した。表から分かるように、問題になり得るような基本波の整数倍に近い高調波モードはないと考える。また、実験値と解析の比較では、非常によく一致していることが分かる。

表 3.25: 基本加速モードと高次モード周波数の比較

測定結果		MAFIA 計算値		備考
周波数 (MHz)	ゲイン (dBm)	モードとの差 (MHz)	モードとの差 (MHz)	
500.01	-41	0	0	基本波 (モード)
500.71	-41	0.748	0.699	/2 モード
771.15	-45	270.184	271.14	
918.87	-44	418.86	412.844	
1077	-46	577	572.604	
1492	-62	992	なし	1.5 倍高調波

3.6 加速空洞の高周波特性試験

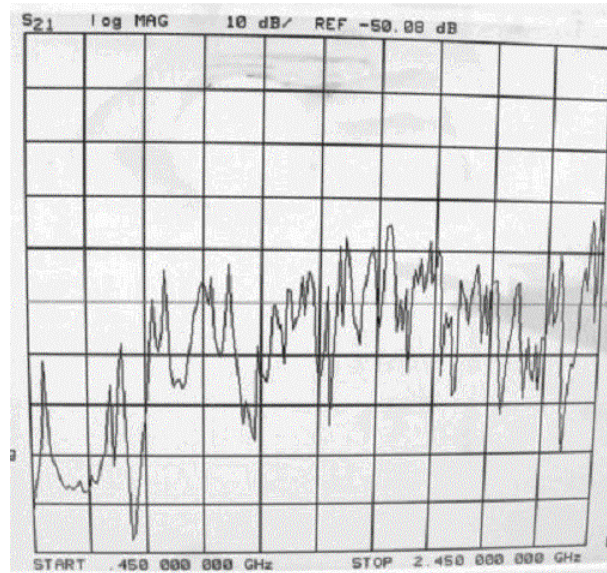


図 3.56: カプラ側のセルでの空洞周波数特性 ($f=450\text{MHz} \sim 2.45\text{GHz}$)

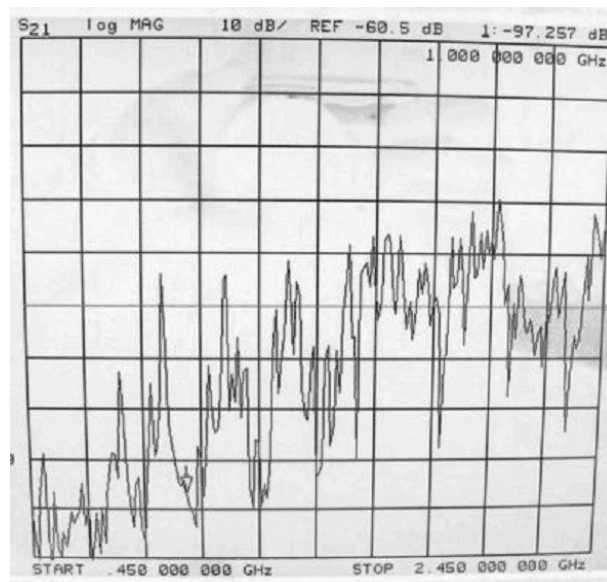


図 3.57: 真空ポンプ側のセルでの空洞周波数特性 ($f=450\text{MHz} \sim 2.45\text{GHz}$)。共振点は 1.04GHz , 1.493GHz , 1.50745GHz , 2.006GHz , 1.99651GHz 、 2.5GHz 近辺には数多くあり 2.49901GHz 、 2.50121GHz

3. 大出力電子線加速器 CWマイクロトロンの500MHzRFシステムの開発

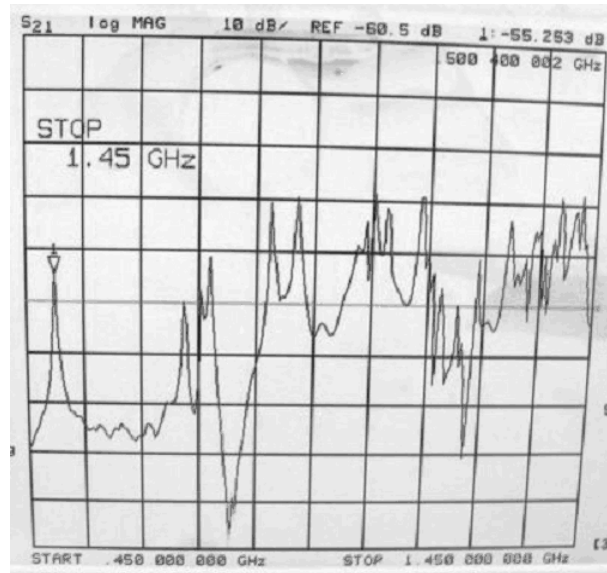


図 3.58: カプラ 側のセルでの空洞周波数特 ($f=450\text{MHz} \sim 1.45\text{GHz}$)

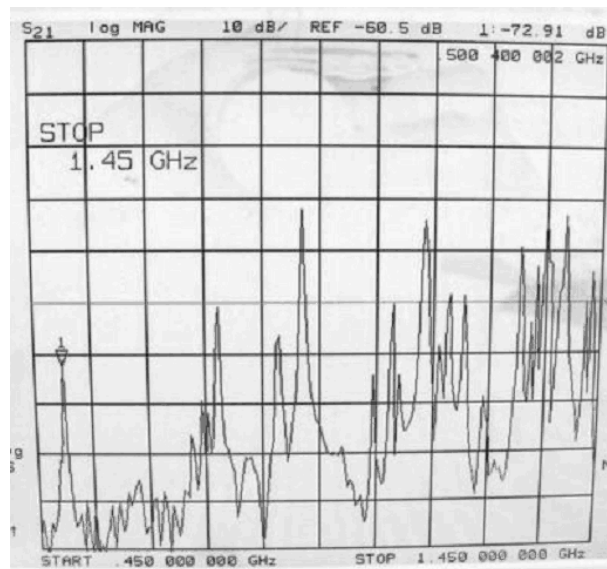


図 3.59: 真空ポンプ側のセルでの空洞周波数特性 ($f=450\text{MHz} \sim 1.45\text{GHz}$)

(b) Q 値測定

スペクトラムアナライザで得られる空洞共振時の周波数特性から、後述する (3.20) 式の関係から方向性結合器の反射波が最小 ($\Gamma = 1$) となる負荷 Q 値 (Q_L) を測定し、その値を 2 倍することで無負荷 Q 値 (Q_0) を求めた。Q 値測定法は共振時の周波数特性のピーク周波数 f_0 に対して 3dB 減衰点の周波数 (f_L : ピーク左側-3dB 点、 f_R : ピーク右側-3dB 点) を測定し、(3.19) 式に従って Q 値を測定した。

$$Q_L = \frac{f_0}{f_R - f_L} \quad (3.19)$$

チューナ取り付け、電界レベル調整後の負荷 Q 値は 15,489 となり、無負荷 Q 値は 30,978 が測定から得られた。ちなみに計算値は、38,000 であり、実測値の 82% に相当する値を得た。更に、後述する大電力試験後には、無負荷 Q 値は 35,000 に増えた。これは、空洞の表面が脱ガス等によってきれいになったためや、RF コンタクト接触部に大電流が流れることにより、接触状態が改善されたためと考える。解析結果に対して 95% の値に相当する。満足できる空洞加工ができたと考える。図 3.60 に空洞周波数特性の拡大図を示す。

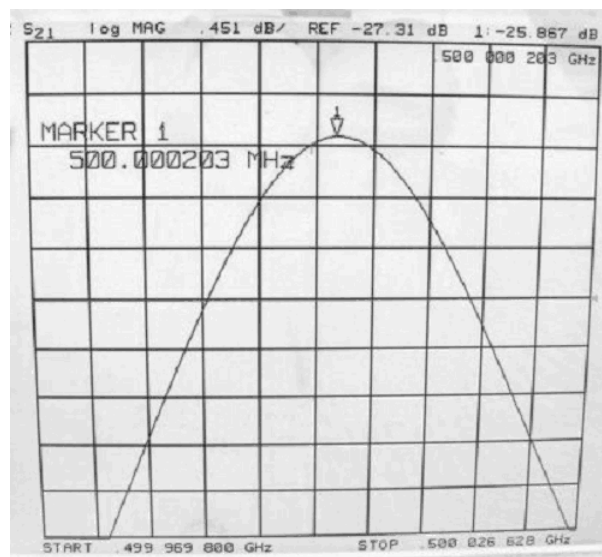


図 3.60: 空洞 Q 値カーブ拡大図 (横軸 5.5kHz/div、縦軸 0.45dB/div)

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

(c) 結合係数 の調整

結合係数は (3.20) 式のように定義される。

$$Q_L = \frac{Q_0}{1 + \beta} \quad (3.20)$$

Q_0 測定後に、 Q_L が所定の値になるようにカプラを回転して調整した。例えば、ビーム負荷による反射が最少になるのは、最大ビーム負荷の半分で最小になるように設定した場合で、この場合 $\beta = 1.34$ である。ここで、空洞のシャントインピーダンスは Superfish による解析値は $34.4M\Omega$ で、その時 Q_0 値は 40944 であり、測定値として $Q_0 = 30900$ とした。結合係数と反射電力の関係については 3.6 節で詳述する。

調整は比較的容易で、3 回のカプラの回転調整で $\beta = 1.35$ が得られた。精度的にはこれで問題ない。また、2 セルの電界レベルには殆ど影響を与えない。共振周波数 500.00517MHz、電界レベル誤差は 0.4% であった。

(d) 2 セルの電磁界バランス調整

一つのピックアップループを使って、両セルの磁界レベルを交互に測定し、それらが等しくなるようにチューナで調整した。ピックアップループは固定でないため、角度誤差が生じるが、フランジネジのガタの範囲内では無視できる様に磁場の向きがピックアップループに対して垂直になる位置付近で使用した。

数回のチューナ調整で 1% 以下の対称性を得た。その時のチューナ挿入量はカプラ側セルとポンプ側セルでそれぞれ 53.07mm と 35.57mm を得た。カプラ側セルの誘導成分が大きいためポンプ側セルと比較してチューナ挿入量が大きいと考える。また、摂動法による電界測定による比較も行ったが、ピックアップループ測定と電界測定との比較は、よく一致していた。但し、電界測定では、僅かな温度変化が測定に影響を与えるため、正確に測定するためには素早く測定する必要がある。そのため、1 ギャップに 2 ピークある点を 2 つのセルで素早く測定してバランスを見た。測定した磁場レベルの差は 0.4% 程度であった。

(e) 電界分布測定

測定手法

摂動法 (perturbation method) [68] による共振器内の電磁場測定を行った。この原

3.6 加速空洞の高周波特性試験

理は、共振器内に金属の小片（摂動子）を入れることで発生する空洞共振周波数の摂動から電場分布を測定する。摂動子がない時の共振周波数を f_0 、摂動子挿入時の共振周波数を f_1 とすると、その位置での電界強度は (3.21) 式で与えられる。

$$E \propto \sqrt{\frac{f_1 - f_0}{f_0}} \quad (3.21)$$

摂動子はアルミ片で製作した。図 3.61 にその様子を示す。測定方法は、摂動子をステッピングモータで連続的に移動させながら、スペクトラムアナライザを用いて共振周波数を連続的に測定した。熱構造の検討から空洞の温度変化に対する共振周波数変化は 7kHz/°C であることが推測される。一方摂動子による共振周波数変化は 20kHz ~ 50kHz であるため、僅かな温度変化が測定に影響を与えるために温度変化に注意しながら測定した。

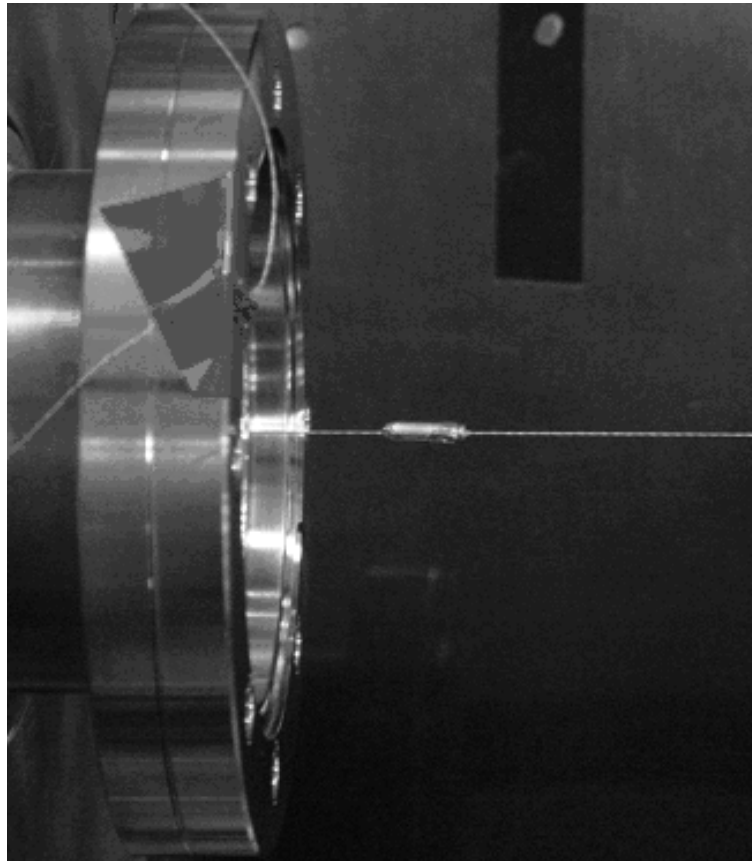


図 3.61: アルミ片で作成した摂動子

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

測定結果

ステッピングモータを用いて 6mm ステップで摂動子を移動させ、共振周波数を測定。図 3.62 はビーム軸上と水平方向に $\pm 28\text{mm}$ ずらした位置でのビーム軸に沿った電界分布である。図 3.63 は、ビーム軸上での測定結果と MAFIA による解析結果との比較したものである。解析との比較のため 2 セル目の電場分布の符号を逆転させている。両者は良好な一致がみられる。

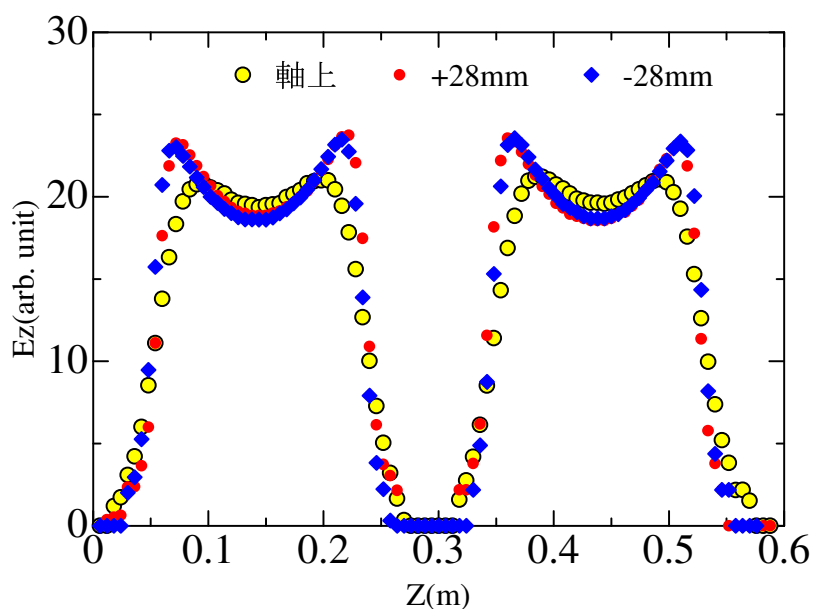


図 3.62: ビーム軸上および半径水平方向 $\pm 28\text{mm}$ 位置での電場分布測定結果

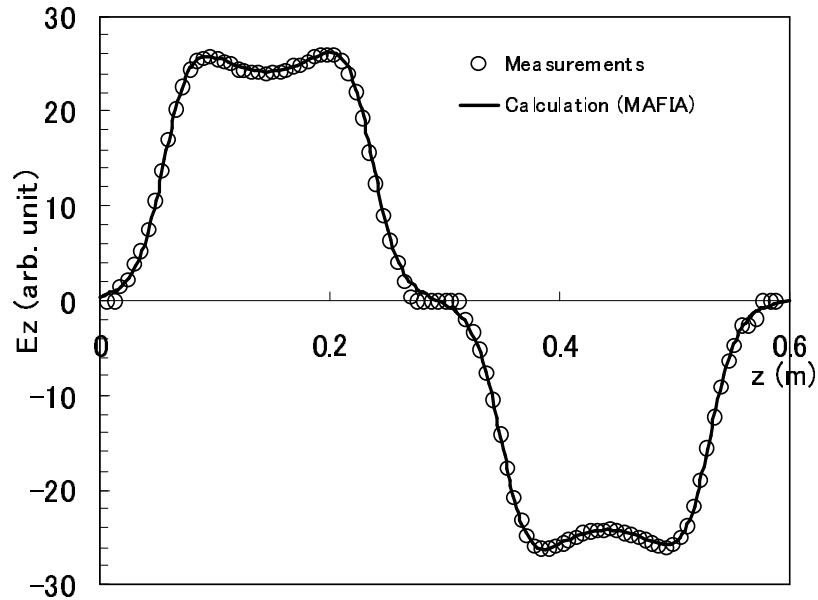


図 3.63: MAFIA 計算値との比較

(f) チューナの最終挿入量

以上の周波数と電界バランスの調節により、2個あるチューナの挿入量は表 3.26 に示す値を得た。

表 3.26: 各セルのチューナ最終挿入量

チューナ位置	挿入量 [mm]
カブラ側チューナ	53.07
ポンプ側チューナ	35.37

尚、1つのチューナの挿入量に対する共振周波数変化の測定値は約 42kHz/mm であり、パルスモータによる1ステップ当たりのチューナの移動量は $0.3 \mu\text{m}$ (13Hz) であるため、十分な高精度で共振周波数設定が可能である。

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

(g) ピックアップループの校正

ピックアップループは 40kW 入力時に 2.5V_{rms} 出力するように結合度 55.3dB となる様に校正した。4ch デバイダを使用するので、位相差検出器接続時は出力 1/2.5 となり入力仕様である 1V_{rms} に設定することと同値になる。校正結果を表 3.27 に示す。

表 3.27: 各ピックアップループ構成後の結合度

カプラ側セル	ポンプ側セル	目標値
-55.2dBm	-55.7dBm	-55.3dBm

3.6.2 大電力試験

本システムの RF 電源は従来のクライストロン等の RF 電源よりも電力効率の良い IOT 管を採用している。IOT は放送局等で広く用いられている。加速空洞自身の壁損失が 40kW あるので電子ビーム出力 50kW 達成のためには出力 100kW の電源が必要になる。CPI 社製の 500MHz-50kW 仕様の IOT 管 2 個で定格出力 100kW とする方式を採用した。それぞれの出力はマジック T によって合成する。

一方、RF 伝送線路はコンパクト化のため大出力機でしばしば用いられている導波管は使用せず同軸管を用いる事によって装置のコンパクト化を図った。図 3.64 に RF 電源から同軸管を使用して加速空洞へ接続している様子を示す。

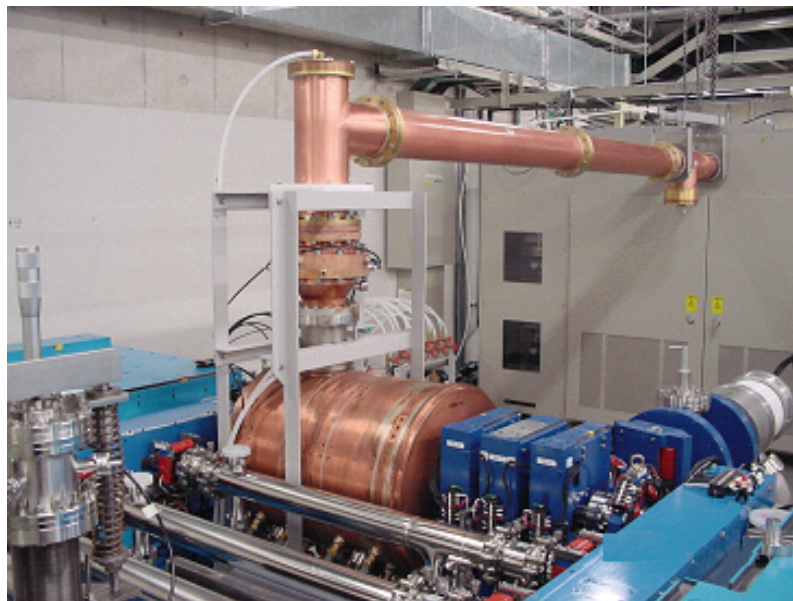


図 3.64: マイクロトロンに組込後、同軸管により RF 電源に接続された加速空洞

(a) 試験装置

ビーム負荷の無い状態であるのでカプラの結合度は $\kappa = 1.0$ とした。500l/s のターボ分子ポンプを真空ポートに接続し、セル毎の真空度モニタリングを行える様に、各セルのゲージポートに冷陰極ゲージを接続した。セル当りの冷却水流量は 50 l/min とし、チューナやカプラ、同軸管等の他機器の流量合計は 30l/min とした。カプラのセ

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

ラミック窓に関しては空冷している。空洞および冷却水温度についてもモニタリングしている。

図 3.65 に大電力試験の機器配置系統図を示す。NI 社の PXI システムと LabVIEW を用いた PC ベースの制御系を構築した。RF 電源からの進行波、反射波を RF 電源に内蔵した方向性結合器よりモニタし、空洞からはチューナ付属のポテンショメータからチューナ位置を、空洞外壁の 4 箇所と冷却水路中に取付けた熱電対から温度上昇を、空洞内真空ゲージによって真空度を監視している。

大電力投入により加速空洞は発熱による形状変位で共振周波数シフトが発生する。これを可動チューナで補正するために空洞内のピックアップループ出力と RF 電源進行波との位相差を位相差検出器により検出し、常時チューナを駆動する feedback 制御する構成とした。また、運転中のインターロックについては、RF 電源の反射波、空洞真空度、カプラのセラミック窓に配置したアーク検出器のインターロック出力信号をそれぞれハードワイアリング接続し、RF 電源の低圧制御系へ接続した。真空計のインターロックは、セラミック窓やその他の機器への深刻な損傷を考慮して真空度 5×10^{-5} Torr (6.7×10^{-3} Pa) に設定した。

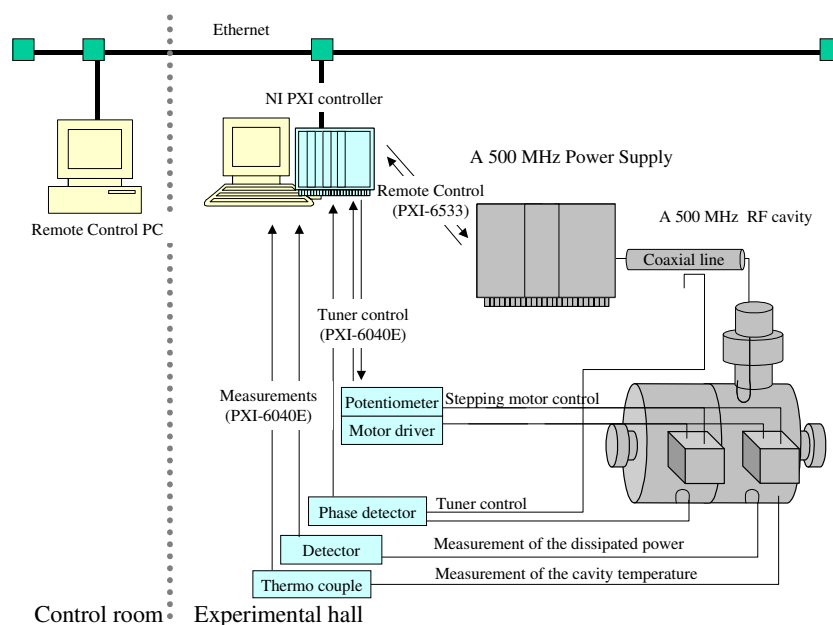


図 3.65: 大電力試験制御システム系統図

(b) 大電力コンディショニング

図 3.66 にコンディショニングの経過時間と空洞投入電力および真空度の関係を示す。

試験は数百 Watt から徐々に電力を投入してゆき、真空度が 5×10^{-5} Torr を上回らない様に投入電力を上げていった。62 時間経過後、投入電力は 40kW に達し、実際の運転に必要な電力を投入することが出来た。尚、40kW 時の反射電力は 2.2kW である。空洞温度上昇による空洞内壁の導電率の変化によって Q 値が減少するためであると推測される。

真空度はコンディショニング前では 8.6×10^{-7} Torr であったがコンディショニング終了後は 6.2×10^{-8} Torr に向上した。

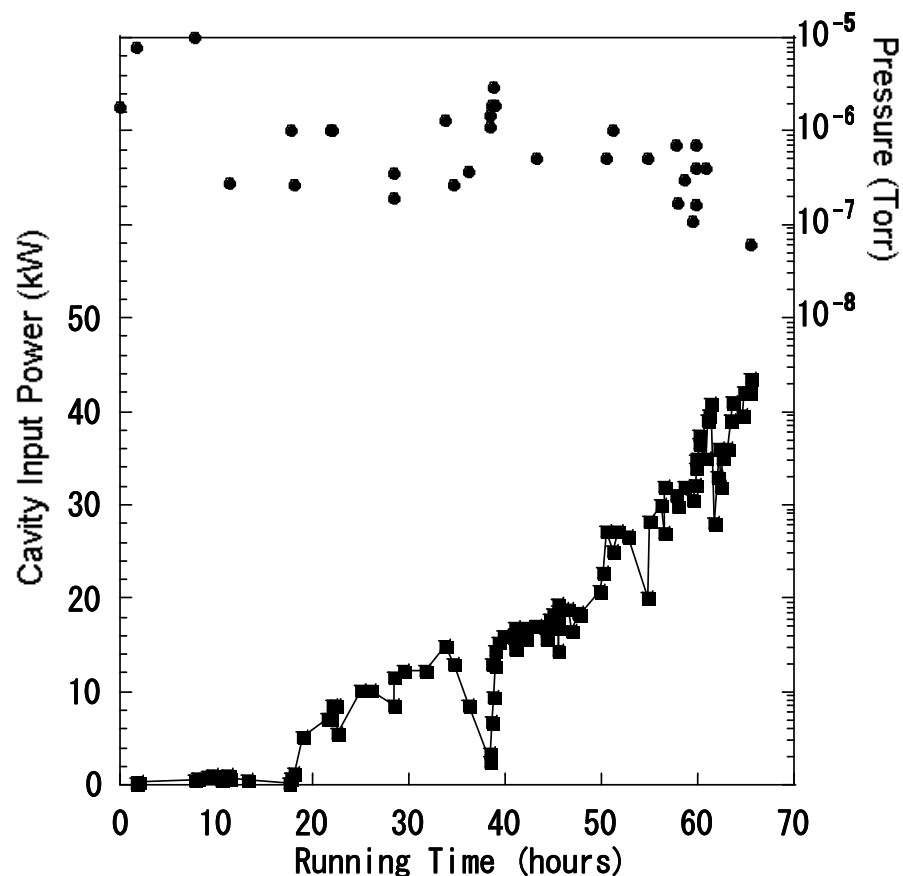


図 3.66: 大電力試験中の空洞投入電力と真空度の推移

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

表 3.28 に 40kW 運転時の空洞外壁の温度上昇を示す。空洞外壁の温度測定箇所は図 3.67 に示す通り。解析結果と 30%以内での一致が得られた。

40kW 運転時のチューナ駆動距離は初期位置から約 4mm 引抜き方向へ移動している。3-7 節で後述するとおりチューナの周波数補正感度は約 40kHz/mm であり、160kHz 程度の周波数補正を行ったと推測する。設計値と 25%以内で一致が得られている。

コンディショニング終了後空洞の無負荷 Q 値は 35000 に向上した。コンディショニングが進むにつれて、空洞内面の脱ガス、大電流通電による RF コンタクタの接触状態が改善されたためと考える。

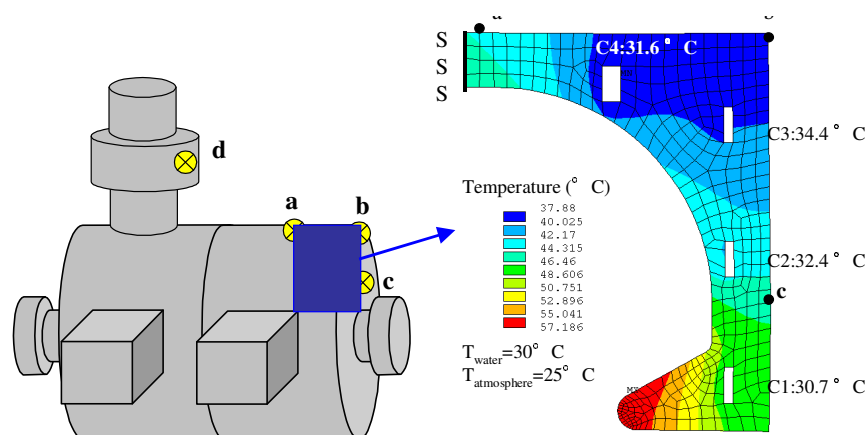


図 3.67: 空洞外壁における熱電対配置箇所。a: 空洞外周に沿ったセル中心位置、b: 空洞側面の外周付近、c: 空洞側面のノーズコーン付近、d: カプラセラミック窓支持部

表 3.28: 空洞温度上昇の測定結果と解析結果比較

Position	Measurement (°C)	Calculation (°C)
a	10.9	12.2
b	4.5	7.9
c	11.1	14.3
d	9.7	-
Water	4.5	5.7

3.6.3 加速空洞高周波特性試験まとめ

(a) 低電力試験まとめ

低電力試験による高周波特性試験を実施した結果、以下の結果を得た。

1. チューナを付けない状態での共振周波数は、空洞の製作許容誤差から予想された範囲内であり、チューナの予想の範囲内での挿入による調整で、500MHz に調整できた。
2. 高調波については、問題になり得るような基本波の整数倍に近い高調波モードはなく、また、実験値とMAFIAの計算値は、非常によく一致していた。
3. Q値は理想値の95%であり、満足できる値を得た。
4. 3回のカプラの回転調整で目標のカプラ結合度 $=1.35$ を得た。また、電場レベル調整後の状態では、上記調整による2セルの電場レベルは殆ど変わらない。
5. 2セルの磁界（電場）レベル調整では、数回のチューナ調整で1%以下の対称性を得た。最終的には、非対称性は測定限界である0.4%程度以下にできた。
6. 共振周波数を1kHz以下の精度で合わせると同時に、カプラ結合度と電界レベルの対称性を高精度で調整できた。

(b) 大電力試験まとめ

加速空洞の大電力試験を実施した結果、以下の結果を得た。

1. カプラ結合度 $= 1$ とし大電力試験を実施した。
2. 約62時間で投入電力40kWに到達し、空洞が実用上問題ないことを確認した。
3. 投入電力40kW下での空洞外壁の温度上昇は30%以内で計算値と一致した。
4. 投入電力40kW下でのチューナ引抜き4mmから周波数補正量は-160kHz程度である結果を得た。同結果は熱構造解析から得た空洞共振周波数シフト-130kHzと25%以内で一致した。
5. 上記3、4.から本設計手法は実測をよく再現しており有効な設計手段であることを確認した。

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

3.7 RF システムの構築

一般市場創出のための要求項目である低コスト化、コンパクト化のために、クライストロン、サーキュレータ、カプラ、導波管型伝送路で構成される従来の RF システムを見直し、①IOT 管の採用、②サーキュレータの不使用、③同軸管 - 同軸カプラ、④同軸管型伝送路による新しい構成を考案した。本節前半では、これらの検討結果を詳述する。

また、500MHz 加速空洞の安定した稼働、および安定した大出力電子ビームの供給に必要な加速空洞の周波数チューナ検討を行った。駆動装置不要の固定チューナの検討を試みた。各種設計精度や運転条件を想定し、様々な視点から検討した。結果として可動式チューナの方が有望である結果を得た。本節後半では、これらの検討結果および可動式チューナの機器設計について詳述する。

3.7.1 IOT 電源による民生利用向け RF システム

(a) 従来の 500MHzRF システム

500MHzRF システムは SR などでも多くの実績がある。大型の SR 装置では、殆ど 500MHz 帯が用いられており、大出力用の RF 電源も数多く実用化されている。大型の SR 装置では一空洞 (5 セルが多い) に 200kW-CW 以上投入することが多く、その空洞が複数配置される。また、中規模 SR 装置でも 1 セル空洞を複数配置する場合もあり、100kW-CW 以上を投入する。これら複数の空洞を有する施設では、1 MW 級のクライストロン電源を用いて、出力を分岐して各空洞に供給する方式がコストの点から多く用いられている。図 3.68 にシステムのブロック図、図 3.69 に SR 装置等で用いられるシンクロトロンの加速空洞を示す [69]。クライストロンは通常の高周波電源でいう終段アンプに相当するが、高電圧部も電圧が高いために非常に大掛かりなものになる。

図 3.69 に示すように高周波伝送路は、冷却が不要な導波管を用いているが、幅 40cm、高さ 20cm とかなり大きなもので、フランジ部は更に大きい。また、カプラは、伝送路が導波管であることから、導波管から同軸管に変換するタイプが全てである。しかし、図 3.69 を見ても分かるように、相当な大きさである。

また、加速空洞からの反射波がクライストロンに戻らないように、伝送線路と加速空洞の間にはサーキュレータが取付けられている。

3.7 RFシステムの構築

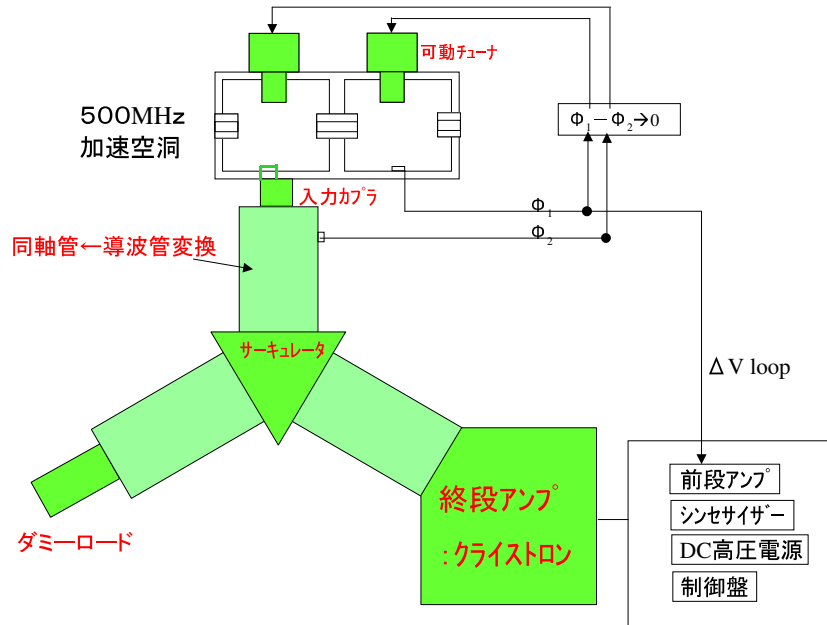


図 3.68: 通常の 500MHz-RF システム

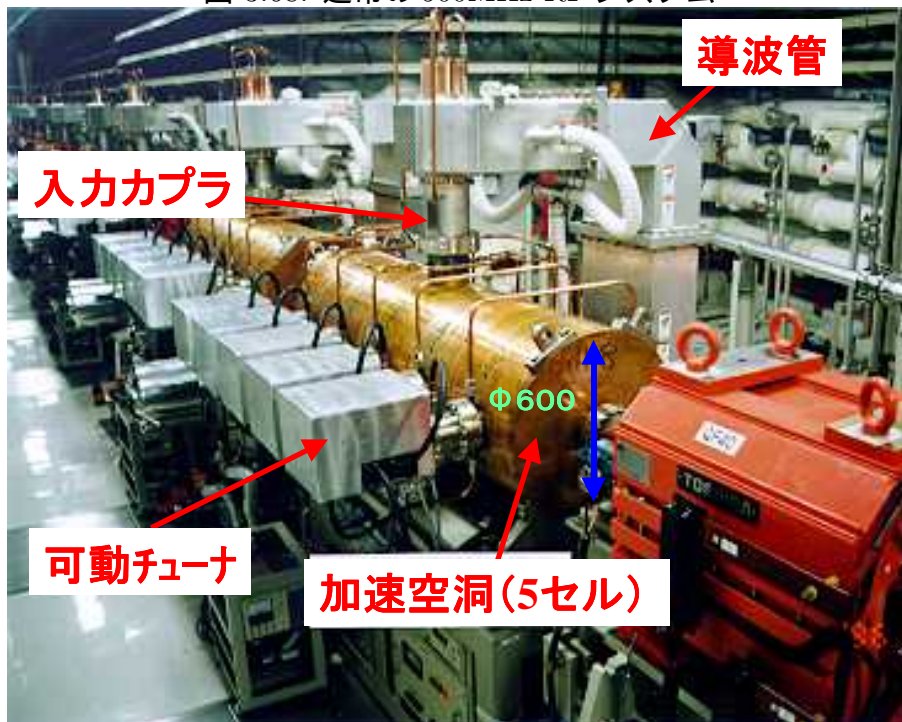


図 3.69: SR 放射光装置での 500MHz z 加速空洞 ([70] より引用)

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

(b) システムのコンパクト化と課題

従来の RF システムは上述した通り大掛かりなものになる。筆者等はシステムのコンパクト化を目標に以下のような方式を検討した。

1. クライストロンに代わって放送用で使われている IOT 管の採用
2. サーキュレータの不使用
3. 同軸管による高周波伝送

これらの問題点として以下が挙げられる。(番号は上に対応)

1. IOT 管の加速器への採用実績は未だ少なく、製造ベンダーが限定される。
2. IOT 管は反射に比較的強いと言われているが、反射パワーを正確に見積る必要がある。本加速器は大強度ビーム加速器であり且つこれまでにない加速方式を用いているため、計算モデルの構築から取り組まなければならない。また、突然のビーム消失など、様々な現象を想定して検討する必要がある。
3. 500MHz 帯でのハイパワーの同軸管 - 同軸カプラ型は世界的に実績がない。キー技術の確立が必要

これらが実現できれば、図 3.70 に示すような簡素なシステムとなる。

(c) IOT 管を用いた高周波電源

従来のクライストロンは、大出力用に開発されているためサイズが大きくなり、容易に手に入るものでは CW 機では最低でも 180kW であり、筆者等が現状で必要としている 100kW レベルではオーバスペックになる。また、サイズが大きくコンパクト化には適さない。これに替わるアンプとして、UHF 帯のテレビジョンで用いられている IOT アンプがある。電力効率が 70% 程度あり高効率であるという特長があるが、加速器関連での使用実績は国内では原研ライナック適用のために試験的に用いられているだけである [71]。

図 3.71 は IOT アンプの概略図である。入力回路(陰極、コントロールグリッド)に三極管の特徴を持ち、出力回路(出力空洞、コレクター)にビーム管(クライストロ

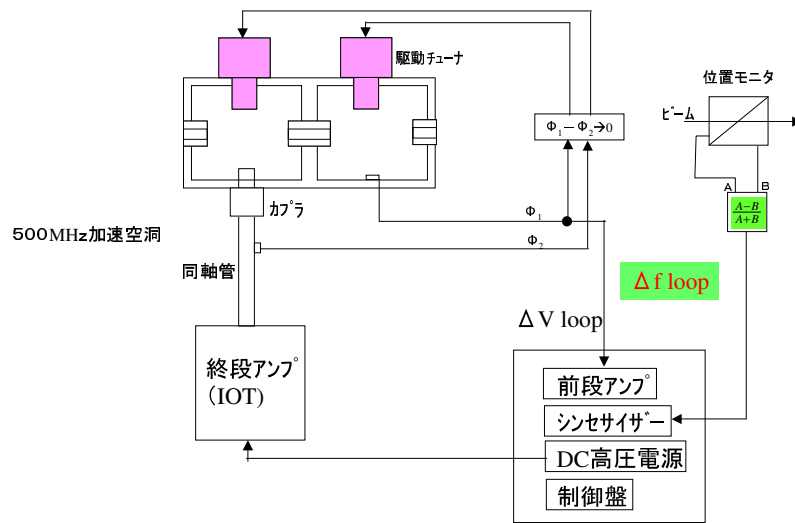


図 3.70: 目標とする RF システム

ン)の特徴を持つ。出力回路にグリッド電極を含まないために電極発熱による出力制限がなく、UHF 帯域 (470 ~ 860MHz) でも高効率で動作できる。励振入力により密度変調を受けた電子ビームがグリッドより引き出され、収束されたバンチが出力空洞に入り込み、クライストロンと同様に高周波電界を誘起し、RF 電力増幅を行う。

IOT は反射に強いと言われているが、製造メーカーにて試験した結果、約 10kW で問題ないことを確認した [72]。IOT は数社で製造されているが、今回発注を予定している米国 CPI 社製はカタログ値 CW40kW、パルス 50kW で、実績としては CW で 50kW を出した例がある。これを 2 台用いて出力を合成して CW80kW とする。

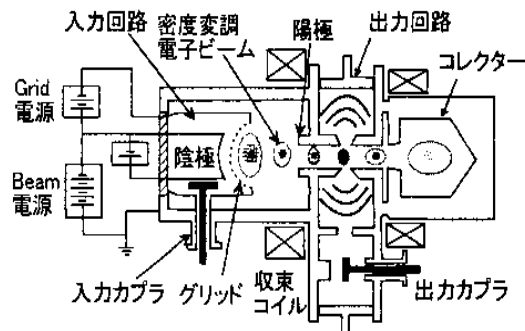


図 3.71: IOT アンプの原理図概略 ([71] を引用)

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

(d) 加速空洞からの反射電力

反射波が電源に戻った場合、IOT 出力ウィンドでの放電などトラブルが発生する。また、ウィンドで放電が発生すると出力のフィードバック制御がうまく働かず正常な出力が発生できない場合がある。このため、通常はサーキュレータを電源と空洞の間に設置し、反射波が電源に戻らないようにする。しかし、システムのコンパクト化、低コスト化を考えると、サーキュレータを除く効果は大きく、今回、反射電力の詳細検討を実施した。IOT の反射電力の許容値は前述したように 12kW である。これ以下で運転するかぎり、信号検出器（方向性結合器）の信頼性が保証できれば正常なフィードバック制御が可能で正常な運転が可能であると考え。反射パワーを検討する上で考慮すべき点として以下が挙げられる。

1. 加速ビームパワー 0kW ~ 30kW 時の空洞入力インピーダンス変化
2. 電子銃トラブル等によるビームの突然の消滅

これらについてビームローディングを考慮した規格化入力インピーダンスでそれぞれの場合の反射電力を検討する。規格化入力インピーダンスは (3.24) 式で与えられる [73]。 I_0 はビーム電流である。ビームパワー 30kW 時の取出されるビーム電流は 6mA であるが加速空洞を通過するビーム電流は空洞を 6 回通過する連続ビームであるため 6mA の 6 倍の電流が通過しているという事になり下式に適用する I_0 は 36mA である。

は共振周波数と運転周波数の差である。

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z} &= Y = \frac{1}{\beta} \left((1 + i2Q_0 \frac{\Delta\omega}{\omega}) - \frac{I_0 R_s h}{V_c} \right) \\ &= \frac{1}{\beta} \left((1 + \frac{I_0 R_s h}{|V_c|} \cos \phi) \right) + i \left(2Q_0 \frac{\Delta\omega}{\omega} - \frac{I_0 R_s h}{|V_c|} \sin \phi \right) \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\Gamma = \frac{Z - 1}{Z + 1} \quad (3.23)$$

$$P_r = \sqrt{Re(\Gamma)^2 + Im(\Gamma)^2} \quad (3.24)$$

加速空洞は、周波数チューナにより、反射が最少となる虚数部がゼロとなるように I_0 の変化に供ない をフィードバック制御する。一方、実数部は I_0 及び に依存して変化する。1. については入力インピーダンスの実数部を最適値になる様に を選択する必要がある。

最大出力の1/2で反射がゼロになる場合、最大出力時に反射がゼロとなる様に を設定した場合、ビーム電流と反射電力の関係は図 3.72、3.73 に示した通りとなり、最大反射電力はそれぞれの場合で1kW、3kW 程度となる。

よって1. を考慮する際、定常運転では用途、負荷に応じて出力を変化させ運転すると考えられるので最大反射電力より小さい $\Gamma = 1.34$ に結合度を調整するのが最適であると考えられる。

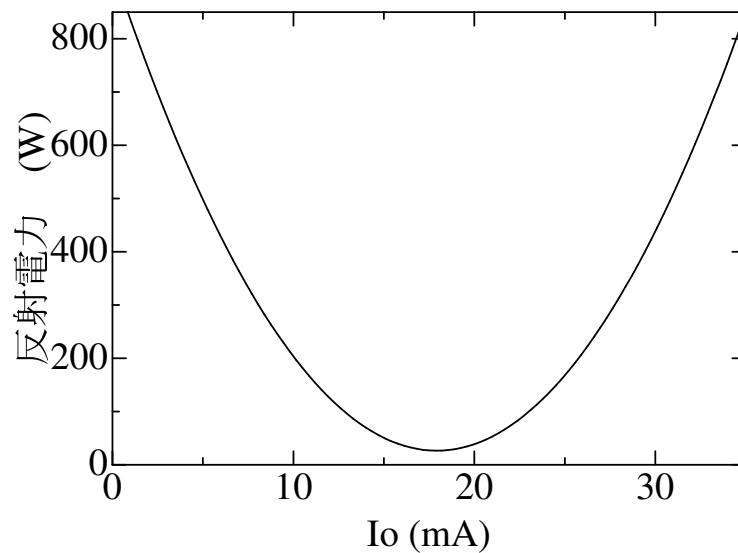


図 3.72: 最大出力の1 / 2 で反射電力ゼロとなる場合のビーム電流と反射電力の関係。
 $\Gamma = 1.34$ と設定

このように、通常の状態では虚数部が常にゼロとなるように運転されているが、ビームが突然消滅した場合、瞬間的に $I_0 = 0$ となるが、 はすぐにはゼロとならないため虚数部が発生し、大きな反射が生じることになる。この現象を図示すると図 3.74 のように表すことができる。ビームに与えていたパワー P_b は壁損失に変わるが、ギャップ電圧を一定に保とうとするフィードバック制御により、徐々に減少する。時間的には ms 以下と思われる。放電的には十分に低い電圧で運転しているため問題ない。一方、反射電力は瞬間的に増えるが、 は30kW 時でも5kHz 程度であり、フィードバック制御によりゼロになるため、これも数 ms で定常状態に落ち着くと考えられる。(3.24)

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

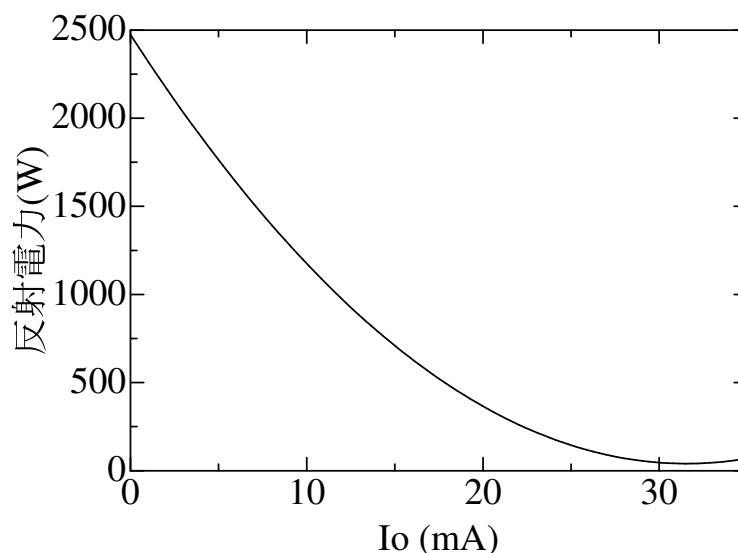


図 3.73: 最大出力時に反射がゼロとなる場合のビーム電流と反射電力の関係。 $\phi = 1.6$ と設定

式から反射電力を見積ると最大 6kW となる。

この際、反射を検出して電源出力をゼロにする方式もある。電源メーカーの東京電子によると、 $30 \mu s \sim 50 \mu s$ でゼロにすることが可能である。どちらにしても、IOT 管の反射の許容値が 10kW 程度であるため問題なく、サーキュレータおよびダミーロードを使用しなくてもよいという結論が得られる。

ここで、参考までにビームの影響について位相図を使って説明する。加速位相 ϕ がゼロ、即ち正弦波のトップで加速する場合、ビームが励起する電磁場の位相は入力高周波の位相と一致するため、電源から見たインピーダンスは純抵抗に見え、 ϕ もゼロでよく共振周波数と運転周波数は常に一致させて運転する。これに対して、 ϕ がゼロでない、これらの位相が異なってくるため 何らかの補正が必要となる。図 3.75 は位相図で、 I_g は入力高周波電流、 V_g は入力高周波によるギャップ電圧、 V_b はビームが励起するギャップ電圧、 V_c はそれらの和である。 V_{gr} 等の r は共振時を表す。共振時はビームが存在しない場合、電源から見たインピーダンスは純抵抗となるため、 I_g と V_{gr} は同位相である。しかし、ビームが存在する場合、等価回路的には電源から見た

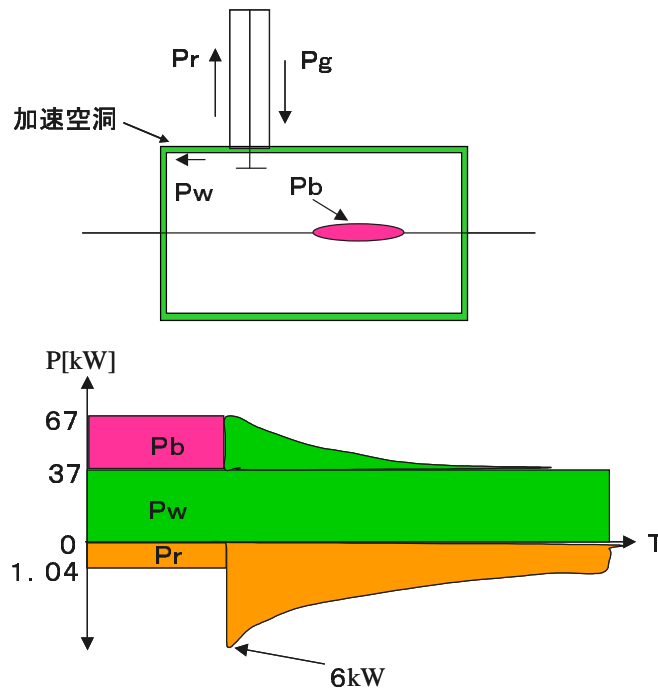


図 3.74: ビーム出力 30kW 時の電子銃出力喪失時の各パワーの変化

空洞電圧は V_{gr} ではなく V_{cr} となるため、電流、電圧の位相は異なる。空洞からの反射を最少にするためには、純抵抗に見える必要があり、 V_{cr} と I_g を同相にする必要がある。このためには、共振周波数と運転周波数をずらして、ディチューン状態にする（その場合、 V_{cr} は V_c となる）。図から分かるように、 ϕ だけずらすことにより V_c と I_g を同相にすることができる。これが、(3.24) 式の虚数部がゼロとなる である。

(e) 入力カップラと伝送路加速器全体システム

図 3.76 に従来用いられている 500MHz 入力カップラを示す。これは導波管から同軸管に変換されるタイプで、セラミック窓は内導体を囲むように配置される。インピーダンス整合は同軸構造のループと対向側の長さの調整で取られる。セラミック窓の内導体側内面はマルチパクターリング放電を抑制するために膜厚 1nm 程度の TiN がコーティングされている。KEKB では厚さは約 1nm である。

これに対して、前述のとおり、本マイクロトロンでは同軸管 - 同軸管タイプを採用する。同軸管 - 同軸管タイプでは円盤型のセラミック窓が必要となる。導波管 - 同軸管

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

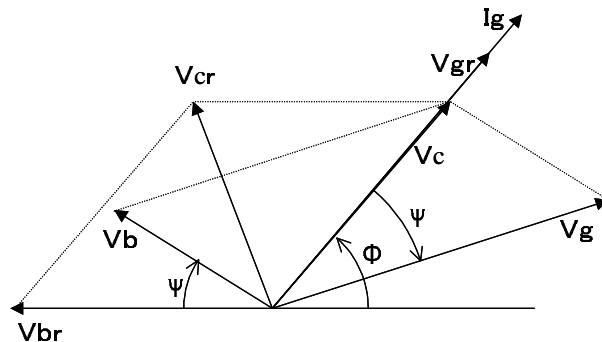


図 3.75: 位相図：ディチューン状態にして V_c と I_g を同位相とした場合。

タイプの先行例としては、より高電力用として KEK で円盤型が開発されてきた [75]。参考になる点を取り入れつつ開発する。開発上ポイントとなる技術課題を下記に示す。

1. セラミック窓によるインピーダンス不整合の補正
2. マルチパクタリング放電対策
3. 内導体及びびループ部の冷却、RF コンタクト

技術課題 1. に関して、セラミック窓が誘電体であることから、セラミック窓でインピーダンス不整合が生じるために、補正する構造が必要である。図 3.77 に代表的な補正方法を示す。チョーク構造は、スロット部によるインピーダンスがセラミック窓部に付加されることにより整合をとる方法で、並列線路の場合のスタブ整合と類似である。Under/over-cut 構造は誘電体により大きくなったキャパシタンス成分を補正するために同軸の内径 / 外径の比を変える方式である。

2. に関して、前者はセラミックに対して垂直な電界成分はチョーク端部だけであるのに対して、後者は内導体の構造からその領域が広がるために、マルチパクタリングが起きやすいという短所がある。また、前者はセラミックの空冷が比較的一様にできる特長がある。よって、チョーク構造による構成を採用する。また、従来手法と同様にこれらのセラミック窓についても真空側は TiN でコーティングする。3. に関しては、結合ループ部において、ループ先端部の接続の接触が少しでも悪いと発熱の問題が生じるということで電子ビーム溶接を採用する。

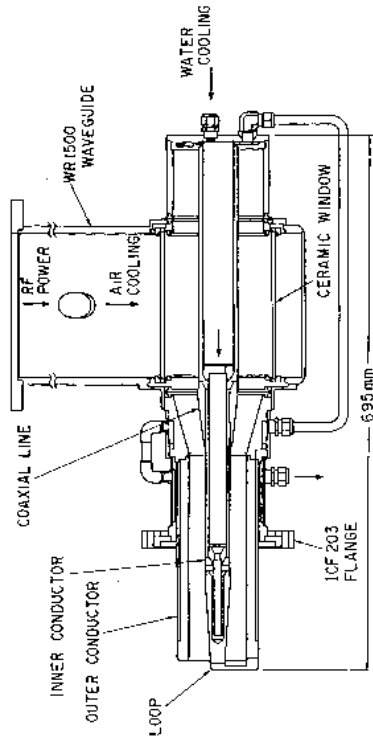


図 3.76: 導波管 - 同軸管入力カプラ ([74] より引用)

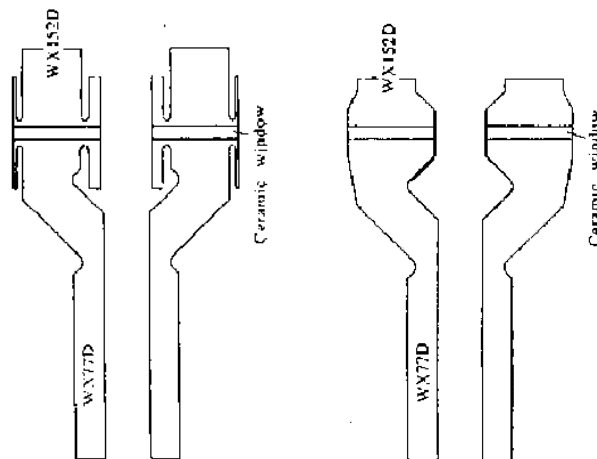


図 3.77: セラミック窓によるインピーダンス不整合の補正方法 ([74] より引用)
 (左) チョーク構造、(右) Under/over-cut 構造

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

3.7.2 チューナシステム

加速空洞の共振周波数は、①空洞設計製作誤差による共振周波数誤差、②空洞温度変化による共振周波数変化の補正、③ビームローディングによるインピーダンスミスマッチ、④高周波電源出力変動によるビーム軌道変動等の原因で設計値に対し実際はずれが生じる。それに合わせて運転周波数をずらすと軌道のずれ及びビームの広がりが生じる。螺旋軌道で且つ位相の安定性がない本加速方式ではサイクロトロンのように大きく $\pm 14\text{kHz}$ で $\pm 1\text{mm}$ 変化する [76]。出射ビームはスキャンして数十 cm 程度に広げて使用するため、多少の変動は問題ないが、空洞内でも同程度のずれが発生する。よってビームの広がり許容値を $\pm 1\text{mm}$ 以下とした。従って、共振周波数も $\pm 14\text{kHz}$ 以下の精度で設定しなければならない。今回、金属ブロックの出し入れで共振周波数の調整を行う可動式チューナを採用した。本節にて製作上必要な、(a) 周波数補正範囲、(b) RF 特性、(c) 駆動部分特性について検討する。

(a) 周波数補正範囲の検討

可動周波数チューナはセル毎に 1 箇所設ける。共振周波数の補正方法は、まず出来上がった空洞の周波数を大気中で測定し、それが設計した運転周波数 500MHz からずれた場合、可動チューナの初期位置を合わせて補正する。この周波数補正範囲は空洞の製作公差の大きさ及び空洞製作過程で生じる空洞変形量と製作誤差によって決まる。空洞製作時の寸法公差と表 3.14 に示す周波数シフトの感度係数から周波数誤差範囲を検討した結果を表 3.29 にまとめる。製作誤差によるチューナの調節範囲は - 18mm ~ + 42mm が必要である。また、真空引き後の RF パワー初期投入及び運転中に生じた周波数シフト又は RF 電源出力変動を補正するのに必要な周波数制御範囲は表 3-6-2 に示すような要因で決まる。

表 3.29、3.30 の結果から、本可動チューナの可変範囲は + 51mm ~ - 23mm となる。つまり、本チューナ長さは 74 mm 以上である必要がある。よってプランジャ長さは 90mm とした。また本チューナの設計基準位置は、表 3.29 の結果に基づいて、空洞内へ 20 mm 挿入した位置にした。

表 3.29: 設計・製作誤差による周波数誤差とその補正のためのチューナ駆動範囲

項目	寸法公差 (mm)	f (MHz)
①2b(空洞内径)	0 ~ +0.1	0 ~ -0.22
②2a(ダクト内径)	0 ~ +0.1	0 ~ -0.03
③gap	0 ~ +0.2	0 ~ -0.40
④r3(外側カーブ部半径)	0 ~ +0.2	0 ~ -0.32
⑤空洞内部壁距離	± 0.1	± 0.02
公差による周波数ずれ (①+②+③+④+⑤)		+0.02 ~ -0.99
ポート部取付誤差(カプラ等)		+ 0.3 ~ - 0.3 (注1)
ロウ付けによる空洞変形		+ 0.4 ~ - 0.4 (注2)
総合計	+ 0.72 ~ - 1.69MHz	
必要チューナ可動範囲	- 18 ~ + 42.2mm(注3)	

注1：MAFIAによる3次元解析におけるメッシュ精度による誤差

注2：KEK-PFの実績値[82]；ずれの方向が明記されていなかった。

注3：-はチューナを空洞内から引き出す、+は挿入を意味する。チューナ感度は約40kHz/mm。

表 3.30: 周波数変動原因とチューナの必要可動範囲

変動原因	周波数シフト/制御量	チューナ移動量/範囲
電源変動(±0.5%)	± 60kHz	± 1.7mm
ビームローディング	-5kHz	+ 0.1mm
RFパワー投入後温度上昇	-129kHz	+ 3.3mm
冷却水温変化(冬夏±15℃)	± 105kHz	± 2.9mm
室温変化(冬夏±15℃)	2.5kHz	0.08mm
ビーム力学から周波数精度	± 14kHz	± 0.3mm
真空引きによる変形	+ 6kHz	-0.15mm
合計		+ 8.3mm ~ -5.1mm

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

(b) RF 特性の検討

空洞内の電磁場モードは TM01 であるが、チューナギャップへ染込む電磁場モードは図 3.78 に示すように同軸の TE11 モードとなる。一方、チューナが傾き、同軸度が悪くなると TEM モードが励起されやすいという現象も KEK-PF にて観測されている。TEM モードは遮断周波数がないため、どこまでも侵入して行き、可動チューナの場合は、ベローズにピンホールを開け真空破壊を起す原因となる。TE11 モードは遮断周波数が存在するが、ギャップは狭いために、運転周波数の 500MHz は遮断周波数よりも十分に低いと考えられ、その場合、染込みの強度は空洞壁面から (3.25) 式に示す様に指数関数的に減衰する。

$$E = E_0 \exp(-k_z s) \quad (3.25)$$

ここで、 $k_z = \sqrt{k_c^2 - k^2}$ である。チューナ構造の設計へ反映させるためのチューナハウジング内への RF 染込み、チューナ駆動量に対する周波数補正量の感度等を検討した。以下 TE11、TEM 各モードにおける RF 染込みについて述べる。

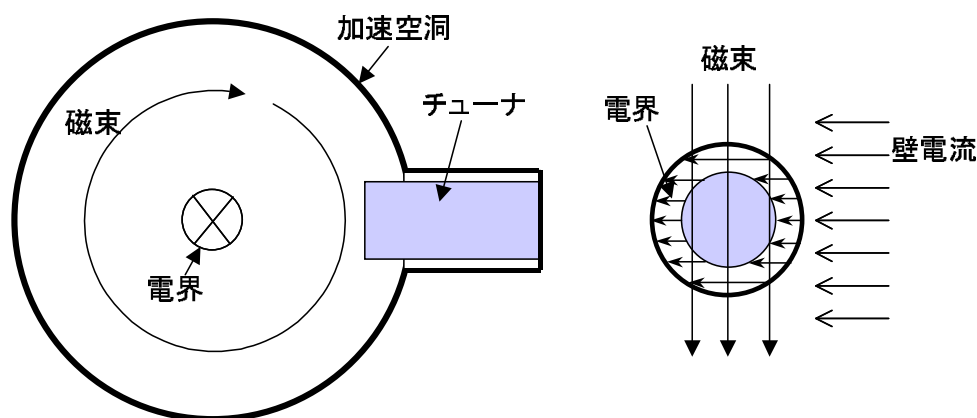


図 3.78: 空洞内 (左) とチューナハウジング付近での電磁界

TE11 モードの染込み

3次元電磁界コードMAFIAを用いて、同遮断周波数を求めた。チューナ同軸部寸法はチューナプランジャ径を67mm、チューナポート筒径を70mmとした。尚、チューナプランジャをハウジング中心から1mm偏芯させ、偏心時を模擬したが、TE11モードの侵入深さに関する議論は偏芯がない場合でも同様に適用できると考える。電場分布のベクトル図を図3.79に示す。また、チューナの同軸部の磁場分布を図3.80に示す。磁場分布の減衰部分を指数関数でフィッティングした結果、その減衰係数が下記となり、この減衰係数から、遮断周波数は1.41GHz、遮断波長は $c = 212\text{mm}$ が得られた。

$$y = 2853.3 \exp(-0.0276x) \quad (3.26)$$

一方、実際のチューナは図3.81に示すように、単純な同軸ではなく、内導体の径が変わり、支持棒にRFコンタクタを設けている。TE11の染み込みによりここを通過する電流をMAFIAで求めた結果、最大13.3A/m(空洞壁面の約1/200)となった。磁場がTEMモードのように支持棒を取り巻くように発生していれば、支持棒直径が26mmであることから、RFコンタクタに流れる電流は1.1Aとなるが、TE11であることから、それ以下であり、概略的にその半分程度と見積って0.5AがRFコンタクタに流れると考える。この値はPEP-IIプランジャ部フィンガコンタクタの電流値2650A/m[77]と比較しても十分に小さい値であると言える。

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

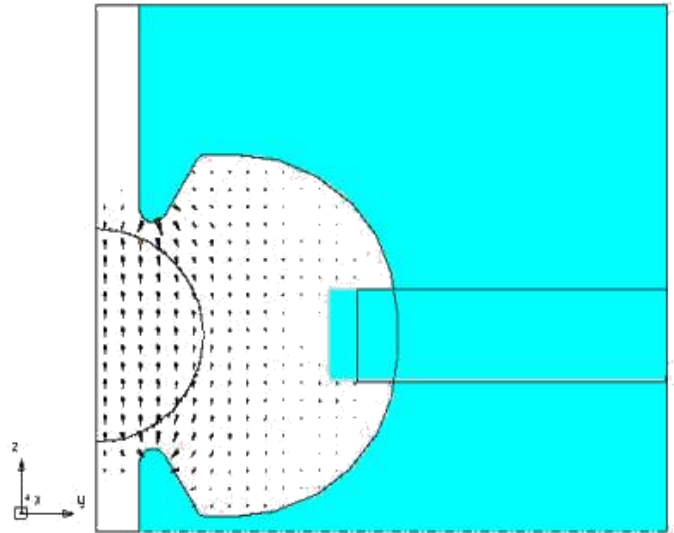


図 3.79: MAFIA 解析による電場分布ベクトル図 (TE₁₁モード)

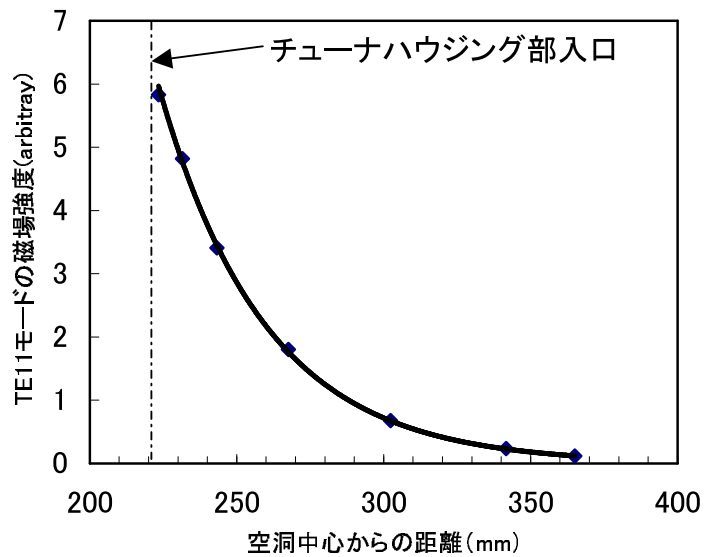


図 3.80: チューナ同軸部磁場の分布と減衰係数

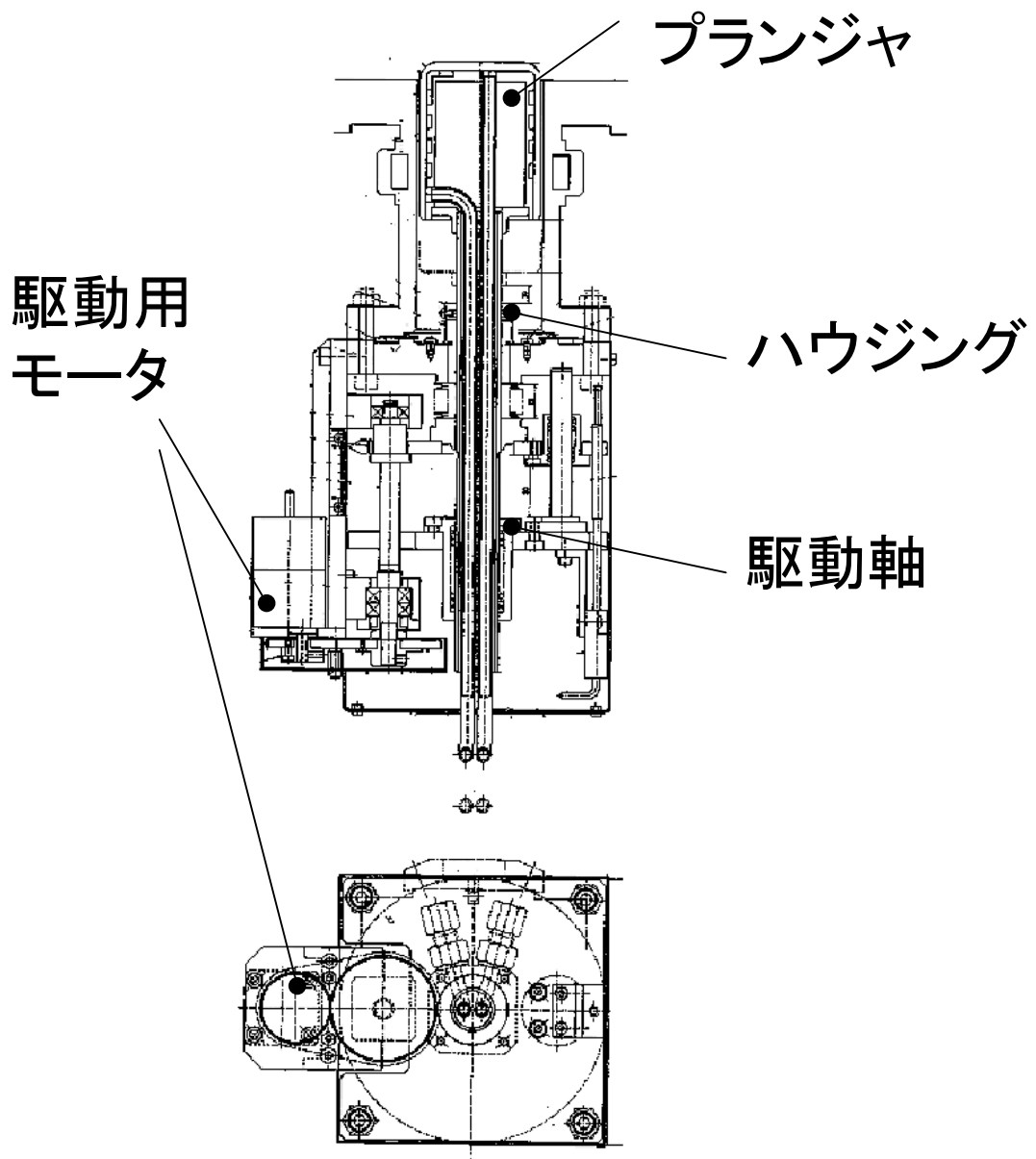


図 3.81: 設計した周波数チューナの組立図

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

TEM モードの共鳴周波数

本チューナではチューナハウジングが基本的に同軸構造を持っており、条件によっては TEM モードの発生もあり得る。従って、設計する上では、TEM モードの共鳴周波数を検討し、空洞の運転周波数から十分に離れた設計を行い TEM モードの励起を防止する構造を検討した。

本チューナの構造は図 3.81 に示すように、チューナプランジャを細い支持棒で駆動する構造であり単純な同軸構造ではない。TEM モード周波数を Superfish で解析した。計算モデルは、空洞を円筒構造に仮定し、高次モードは無視してチューナハウジング内の基本モードだけに着目した。結果を図 3.82 に示す。空洞壁面から RF コンタクタまでの距離を 120mm としたチューナプランジャ径、およびチューナポート径をそれぞれ内径、外径と仮定した同軸管モデルから解析的に計算される $\lambda/4$ 共振周波数は 625MHz に対し、結果は 200MHz 以下と大きく異なっていることが分かる。また、支持棒の直径がチューナと等しくなった場合には、チューナ構造が単純な均一同軸となり、625MHz に近づくことが分かる。また、図 3.83 には、チューナの空洞内挿入量による TEM モード周波数の変化を示す。125MHz から 175MHz まで変化することが分かった。

このように、本形状によれば基本共振周波数は運転周波数 500MHz よりも十分に低い問題ない。本チューナの周波数感度は図 3.84 に示す通りである。また、プランジャとポート壁のギャップは、マルチパクタリング防止の観点から 1mm から 2mm が望ましいので、1.5mm に決めた。チューナと同軸部寸法を表 3.31 にまとめる。

表 3.31: チューナ寸法まとめ

項目	寸法
ハウジング内径	73 mm
チューナプランジャ径	70 mm
支持駆動用パイプ径	26 mm
チューナプランジャ長	90 mm
支持駆動用パイプ長	~ 160 mm
RF コンタクト位置	約 128 mm (空洞壁から距離)

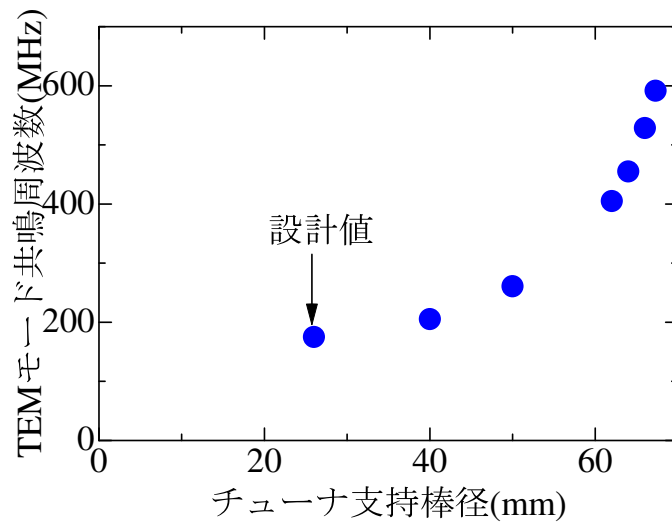


図 3.82: チューナプランジャ支持棒径と TEM モード周波数の関係

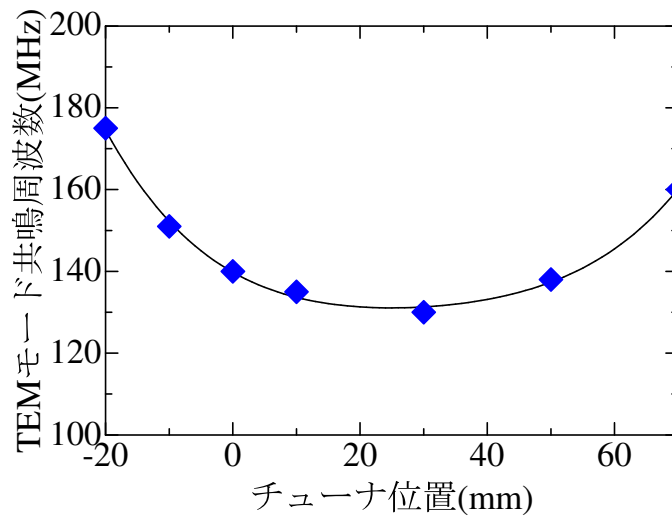


図 3.83: チューナプランジャ位置と TEM モード周波数の関係 (プランジャ支持棒 26)

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

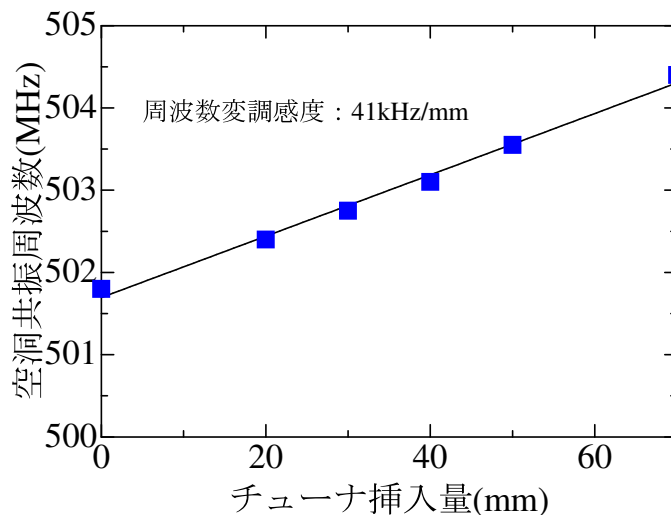


図 3.84: チューナ駆動による周波数変調感度

(c) 駆動部特性

チューナ駆動部の検討をする。検討すべき項目として以下の2点がある。

1. チューナ駆動精度
2. 駆動用モータスペック

1. に関し、高周波設計から要求されるチューナ駆動精度は $3 \mu\text{m}$ 以内である。これはビーム軌道の位置補正、および高周波電源安定度から空洞共振周波数を 100Hz 程度で制御する必要がある為である。尚、チューナ駆動幅に対する周波数変調感度に関しては前節に記述した通りである。ここではチューナ駆動機構の構造、およびモータの最小駆動角度を基にチューナの駆動精度を算出する。

2. では、予め選定した駆動用モータでチューナが問題なく駆動できるかどうかを検討する。チューナ全体を駆動する際に要するトルク、およびモータの許容トルクを比較する。また駆動する際、チューナ駆動幅 $\pm 15\text{mm}$ の移動に要する時間についても検討する。

チューナの駆動精度

簡略的な構造を図 3.85 に示す。駆動モータはオリエンタルモーター社製のステッピングモータ UPK543W-T7.2 を選択した [79]。ギヤ比、ボールねじリードはそれぞれ、1.5 (モータ側ギヤ 1.5 回転 = チューナ側ギヤ 1 回転)、2mm/rev (チューナ側ギヤ 1 回転でチューナ 2mm 移動) である。一方、モータの最小ステップ角は 0.1° である。この際のチューナ移動量は駆動機構のギヤ比、リードから $0.4 \mu\text{m}$ 程度であり、チューナの駆動精度は仕様を十分に満足する。

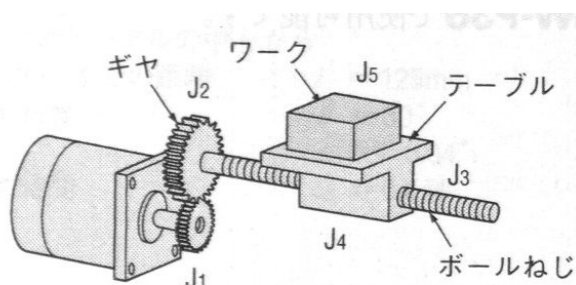


図 3.85: チューナ駆動機構の概略図 ([79] より引用)

駆動用モータのトルク検討

駆動用モータのチューナ駆動に要するトルクを算出する。系全体を駆動する為に、駆動機構の全トルクがモータ許容トルクを満足する条件を算出する。全トルクはモータ運転時に接触部分の摩擦抵抗により発生する負荷トルク、駆動機構の全慣性モーメントを加速する際に必要な加速トルクの和で算出する。

図 3.86 に算出したトルクの依存性を示す。仕様記載の許容トルクは 7kgcm であり、パルス周波数 9500Hz 程度を下回っておけばモータの許容値を下回る。実際のチューナでは 20% 程度の安全マージンを更にとり、用いるパルス周波数は 8000Hz 以下で設定する。

イナーシャ比検討

またモータ起動時、停止時のオーバーシュート、アンダーシュートを防止するためのイナーシャ比についても確認した。仕様であるイナーシャ比許容値 10 に対して、本

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

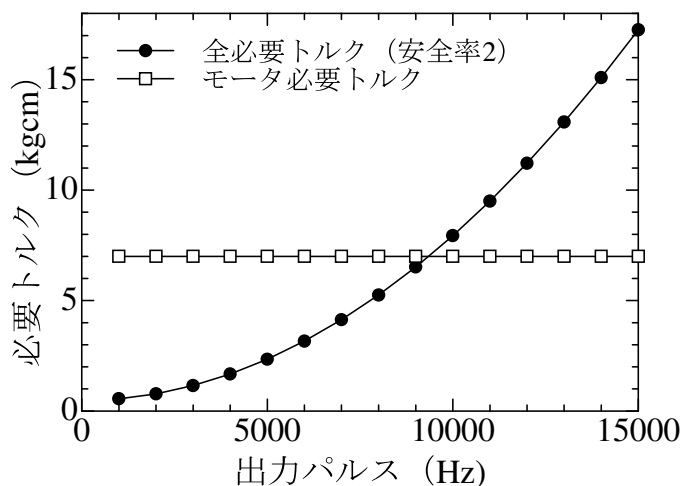


図 3.86: モータ必要トルクと出力パルス周波数の関係

チューナシステムのイナーシャ比は 8.6 であった。よって許容範囲内である。

チューナ駆動速度検討

駆動パルス周波数に対するチューナ駆動速度を検討する。チューナ駆動速度は回転数、ギヤ比、ボールネジリードの関係により、パルス周波数に対する所要時間、各パラメータは表 3.32 の通りとなる。30mm 駆動に要する時間は駆動パルス 1000 ~ 8000Hz で 80 ~ 10 秒程度となり実用上問題ないと考える。

表 3.32: チューナ移動速度、加速トルク、チューナ必要パルス周波数の関係

f (Hz)	加速トルク (kgcm)	全必要トルク (kgcm)	モータ許容トルク	30mm 移動時間 (sec)
1000	0.037	0.11	7	81
3000	0.34	0.71	7	27
5000	0.93	1.9	7	16
6000	1.34	2.72	7	14
7000	1.83	3.69	7	12
8000	2.39	4.81	7	10

3.7.3 全体システム

これらのRFシステムを構成すると、コンパクトなシステムが実現できる。例えば、図3.87はRF電源を遮蔽室外に設置して遮蔽室をできるだけ狭くした例である。ビーム軌道高さは0.8mとした。伝送路を導波管としたため、遮蔽壁の貫通穴の影響は小さく、局所遮蔽が必要としても比較的容易にできる。また、同軸管は内導体の冷却が必要で、カブラの冷却と一緒に行う効果的な方法を考える。冷却水取出し口は図に示すように上側である。横に取出す方式がコンパクトになる場合もあるが、ループカブラの最終調整ではループの回転が必要であり、その際内軸もいっしょに回転させる構造となり調整作業という観点では実現は難しい。また、同軸管は120Dでは放電の心配があり、152Dとした。ちなみに、500MHz - 100kW-CWのそれぞれの同軸管での電力損失は、120Dの場合100W/m、152Dの場合80W/mである[80]。

同様に、図3.88に示す自己遮蔽が容易にできるシステムも考えられる。電子銃は80keVであり、放射線的には問題ないため遮蔽外に設置する方式としている。

また自己遮蔽方式の場合、図3.89に示すように照射室の上に設置すると、より効果的な全体システムが構築できる。取出し用電磁石を2台の偏向電磁石の間に置き、真下に取りだし照射する方式であり、照射室への貫通穴も自己遮蔽材で覆われているため、非常に効果的である。このシステムだと、遮蔽室は照射室だけでよい。

図3.90はIOT管を加速器の下側に配置した例であり、サーキュレータの不使用によりこのような方式も可能になる。自己遮蔽壁の伝送路の貫通穴がないため、より完璧な遮蔽が可能となる。現状のIOT管は縦置きを前提に配置設計されているが、IOT管を横置きにすることも可能であるので、将来的には図3.90の方式は有望であると考えられる。さらにIOT管の大出力機種が製品化されるとIOTアンプは更に小型化され、本構成はより効果的なシステムになる。

図3.91は自己遮蔽方式CWマイクロトロンによる照射施設の概観図の一例である。一方、図3.92は従来の静電型の電子線加速器を用いた照射施設の斜視図の一例である。静電加速器では加速器本体や、絶縁ガスとして併設が必要となるSF₆ガス等の施設全体に占める割合が大きく、建屋全体は照射処理・搬送ライン以外にも多大なスペースを要する。これに対し、CWマイクロトロンによる照射施設では加速器のコンパクト化、及び放射線の自己遮蔽により、建屋2階の占める割合が大幅に削減可能となる。

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロン の 500MHzRF システムの開発

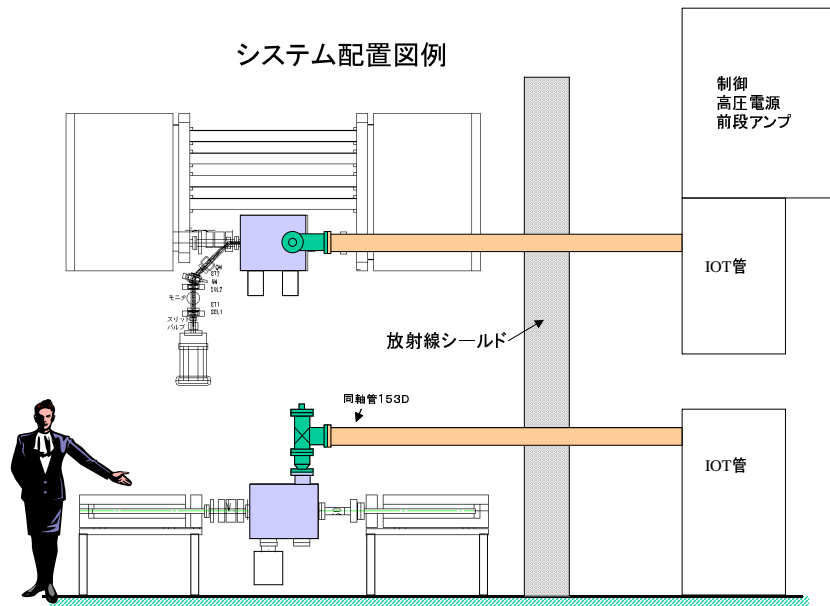


図 3.87: システム配置例 I。ビームラインをできるだけ下げ加速器をコンパクトに見せる。また、IOT 管を遮蔽室外に設置し、遮蔽室内のシステムをコンパクト化した

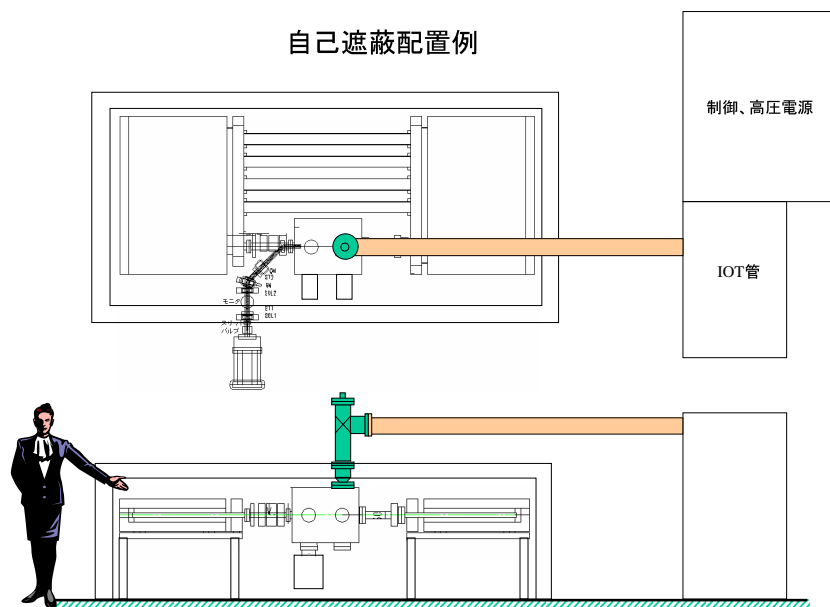


図 3.88: システム配置例 II (自己遮蔽型)

照射室上に配置

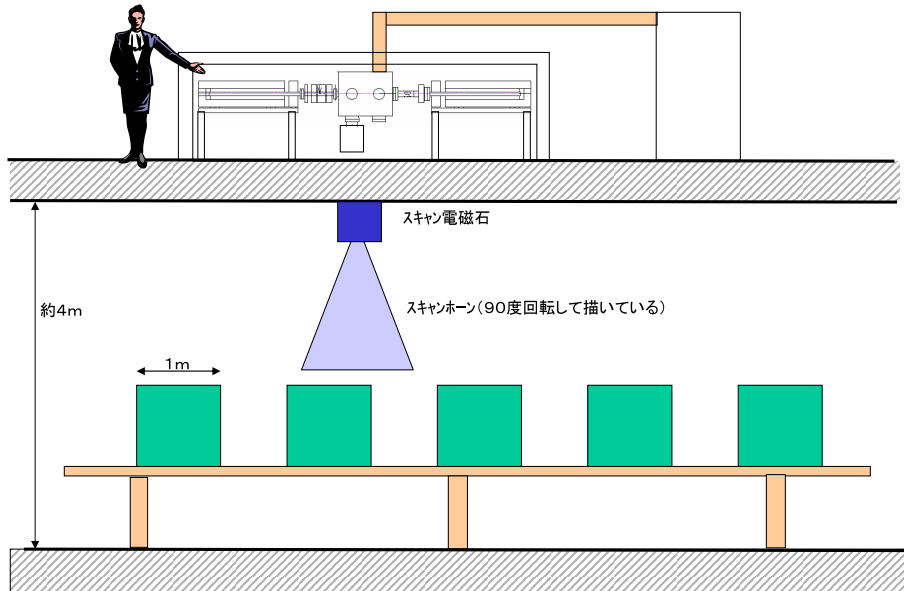


図 3.89: システム配置例 II-1。自己遮蔽した加速器を照射室真上に設置。照射室への貫通穴も自己遮蔽壁で完全に覆われ、加速器室は通常の建屋としたコスト低減。

自己遮蔽配置例

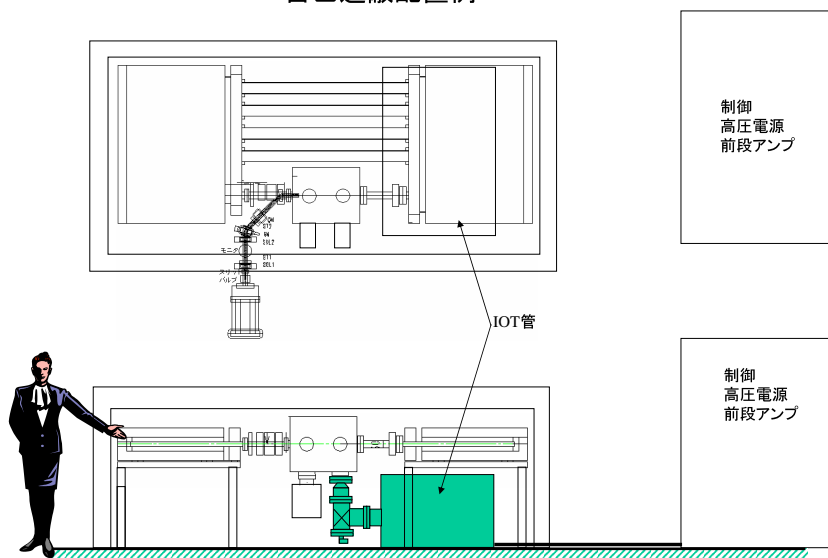


図 3.90: システム配置例 II-2。IOT 管を加速器下に配置。

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

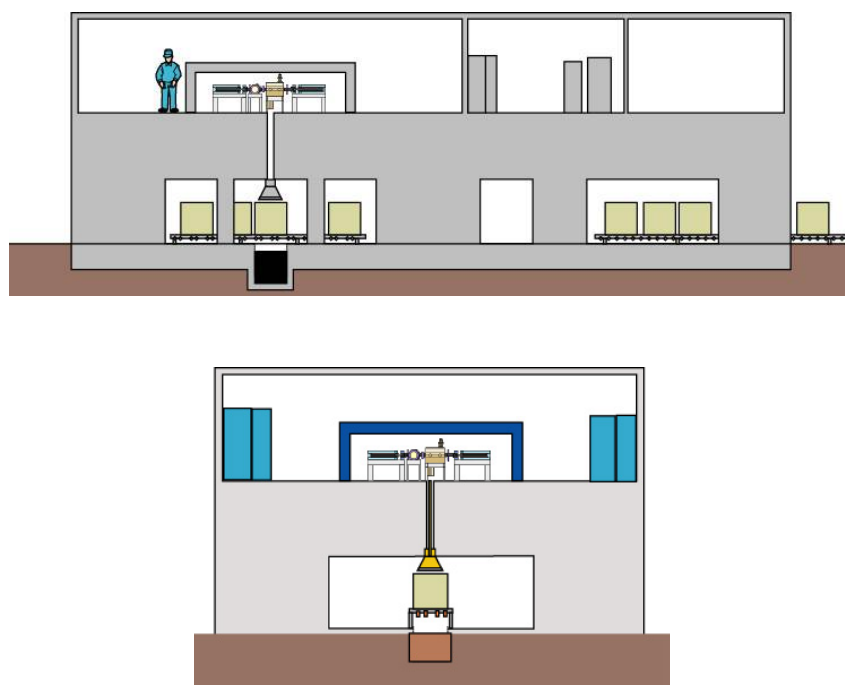


図 3.91: 自己遮蔽方式 CW マイクロトロンを用いた照射処理施設概観図

3.7 RFシステムの構築

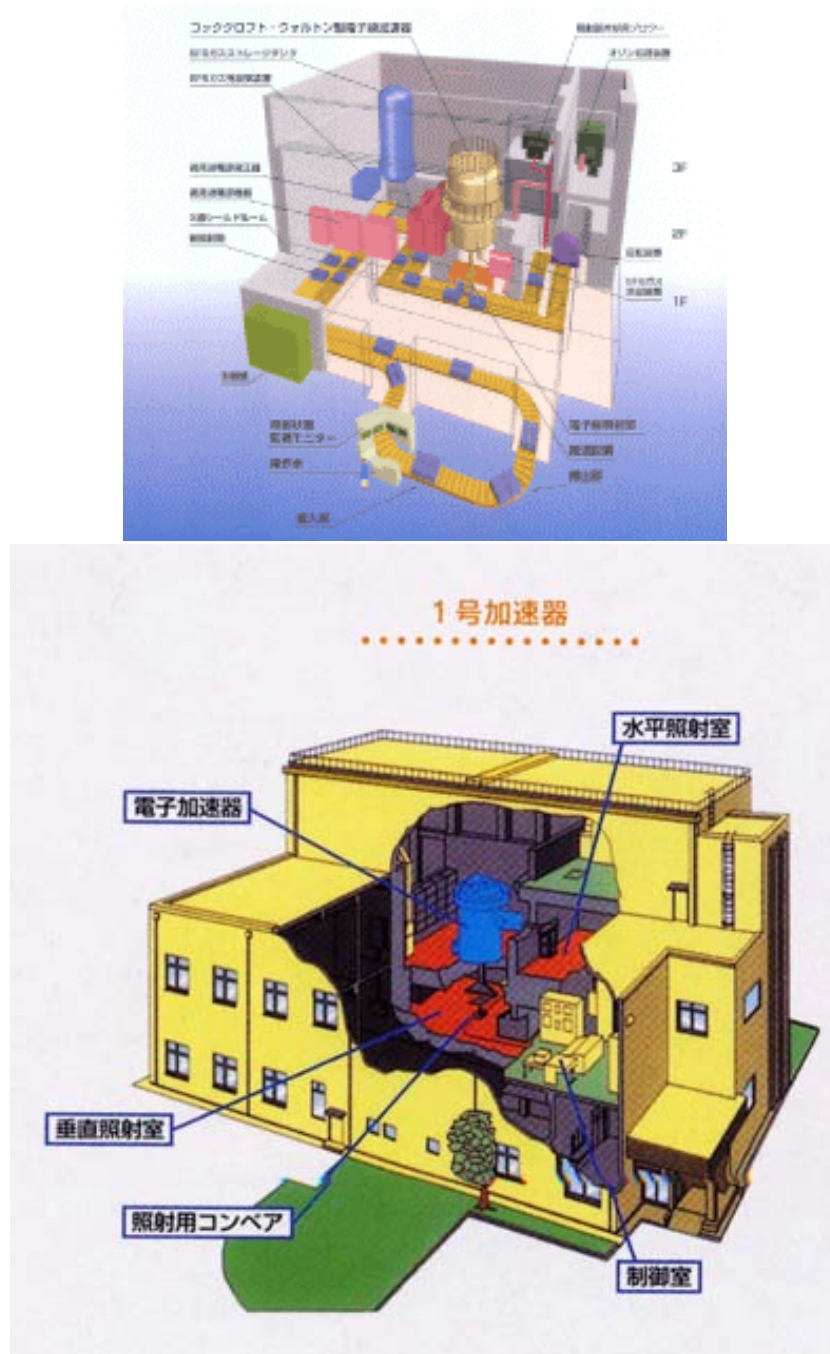


図 3.92: 静電型加速器による放射処理施設鳥瞰図：大型加速器、絶縁ガスタンク等により建屋2階にも大きなスペースを必要とし、厚い遮蔽壁で構成される。([83]、[84] を引用)

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

3.8 ビーム加速実験

試作した加速空洞及び他構成機器の組立てを行い、5MeV プロトタイプ機のビーム加速試験を行ったのでその結果を述べる。電子銃の 500MHzCW ビーム発生試験、および 5MeV ビーム加速試験の順で実施した。

3.8.1 500MHz 電子ビーム発生および入射ラインビーム試験

電子銃の特性試験を実施するために、マイクロトロンに組み込む前に、2台のソレノイド電磁石と1台の四極電磁石、ビームモニターからなる直線ラインで試験した。モニターは、蛍光板とファラデーカップを用いた。図 3.93 はその検出信号を 50GHz サンプリングオシロスコープで観測したものである。500MHz にバンチしたビーム波形がよく測定できている。バンチ幅は約 300ps で、RF 位相幅に換算すると約 60°であり、独自に開発したシミュレーション [85] と良く一致する結果が得られた。また、バンチの位相変動は 1°以下であった。

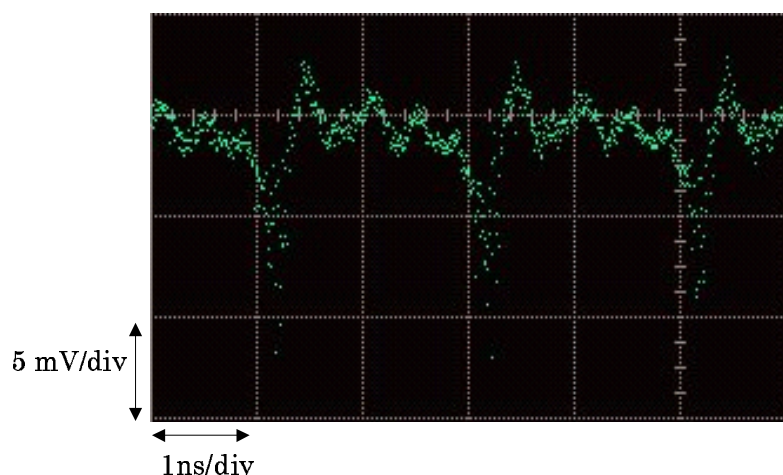


図 3.93: 500MHz の電子ビームバンチ波形。横軸は 1ns/div、縦軸は 5 mV/div。50 GHz デジタルオシロスコープで測定

図 3.94 は、電子銃シミュレーションによるカソード - グリッド間電圧に対するエミッション電流のピーク値とビーム試験結果を示す。50kW ビーム出力に必要な平均電

流 10mA を得るためには、ピーク電流としては 250mA 必要である。計算値と測定値は良く一致していることが分かる。

図 3.95 は、エミッタンス測定の結果を示す。測定は 4 極電磁石と蛍光板モニタを用いて実施した。具体的には、4 極電磁石の強度を変化させ、ビームサイズの変化カーブからエミッタンスを導出した。図からわかる様に計算と測定は良く一致している。また水平・垂直方向に対称な電子ビームが発生できていることがわかる。

次に電子銃及びシケイン電磁石を含む入射ラインを組み合わせた入射ビーム試験を、RF 加速空洞位置にファラデーカップを設置して行った。ビーム調整の結果、水平方向のビームサイズ： $\pm 5\text{mm}$ 、垂直方向： $\pm 4\text{mm}$ にすることができ、設計値と一致させることができた。ビーム中心位置は $\pm 0.2\text{mm}$ の精度で理想軌道中心に一致させることができた。

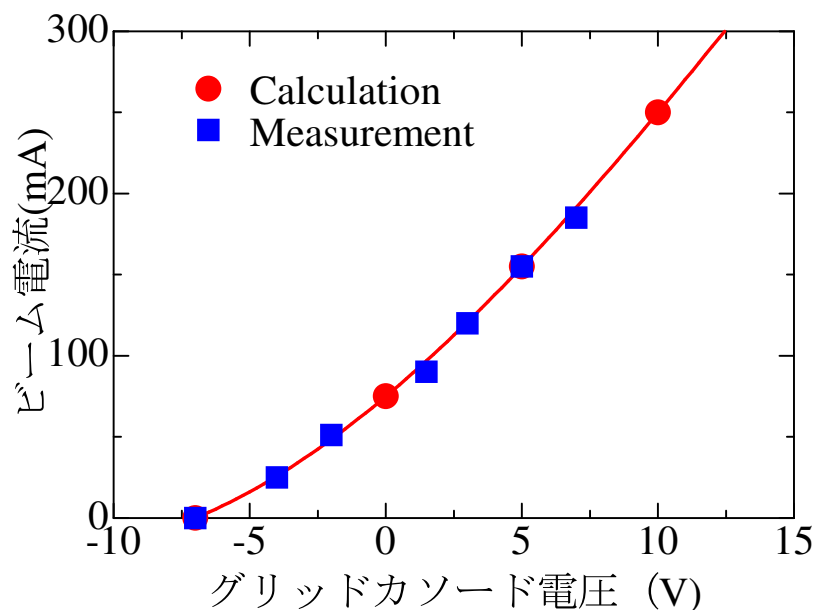


図 3.94: カソード - グリッド電圧に対する引出しピーク電流の計算値と測定値

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

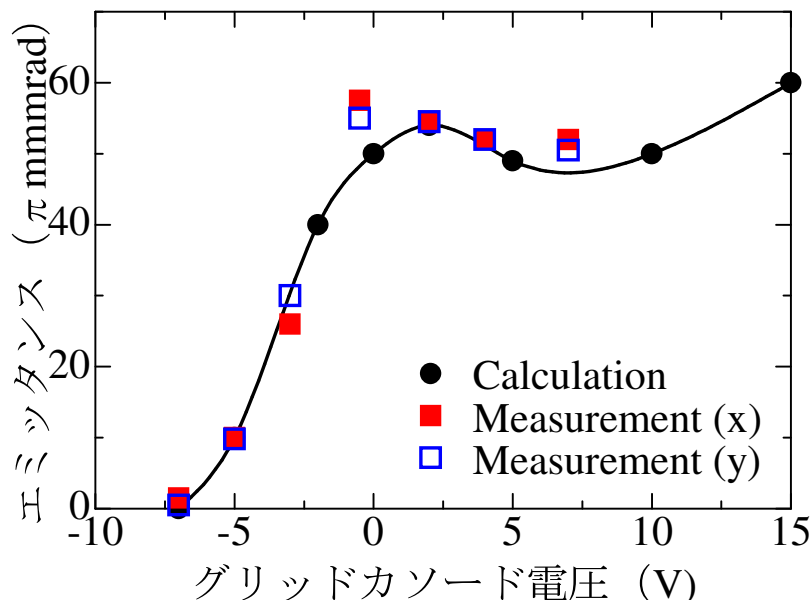


図 3.95: カソード - グリッド電圧に対する引出しビームエミタンスの計算値と測定値

3.8.2 5MeV ビーム加速試験

電子銃から入射した 80keV 電子は (a) RF 加速空洞第一ターン加速、(b) ビーム収束力、および (c) 周回ビーム位相について調整をし、(d) 5 MeV ビーム加速を実施した。以下、各項目の詳細を述べる。

(a) 500MHzRF 空洞第一ターン加速

80keV 電子は光速の約半分の速度である。1 ターン目の電子は減速位相で RF 加速空洞に入射し空洞通過中に加速位相とするタイミングに調整する必要がある。上記を実現するには、電子銃で発生する CW 電子ビームと RF 加速電界の位相を高精度に合わせる必要がある。加速試験では、最初に電子銃から DC 電子ビームを発生させ電磁石パラメータの調整を行い、次に CW 電子ビームを用い、電子ビームの位相と RF 加速電界の位相を位相シフターで最適位相に調整した。

(b) ビーム収束力調整

CW マイクロトロンにおけるビーム収束力は以下 3 種類である。

1. RF 加速空洞での RF 電磁界収束力
2. 偏向電磁石出口の漏洩磁場による収束力
3. RF 加速空洞両脇に設置された 2 個の QM 電磁石による線形収束力

ビーム実験で変化させることが可能なパラメータは、3. の 2 個の QM 電磁石のみである。ビーム開始前に、1. と 2. の収束力を正確に見積もり、制御しておくことが必須となる。

よって MAFIA で計算した 3 次元電磁界分布を用いて収束力を評価した。図 3.96 に 80keV ビームが RF 加速空洞を通過する時のビームエンベロープの計算結果を示す。RF 空洞通過によりビームエンベロープは大きく変化し、非常に大きな収束力が RF 加速空洞部で発生していることがわかる。また、この収束力は RF 加速位相によって大きく異なるので、加速位相の正確な制御が必須となる。

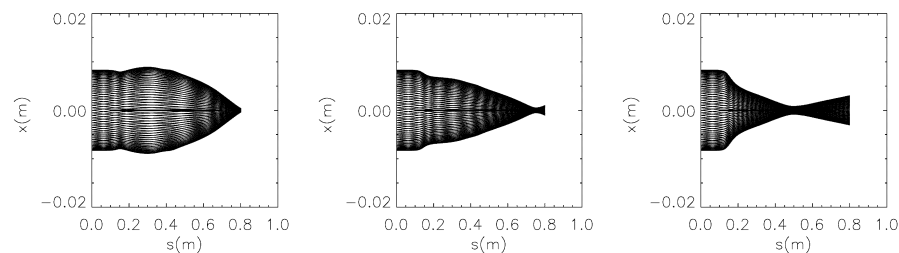


図 3.96: 80keV 電子ビームの RF 加速空洞通過時のビームエンベロープ計算値 (図左から相対加速位相-15 度、0 度、15 度で RF 空洞に入射する条件)

次に、偏向電磁石出口の漏洩磁場による収束力は主に垂直方向の収束力となるが、磁場測定結果を基に調整した。一方、QM 電磁石による線形収束力は前述の 2 項の収束力と比較すると弱い。また、QM 電磁石の収束力は電子ビームのエネルギーが大きくなると、急激に弱くなる。よって、QM の線形収束力は、他の収束力の垂直・水平方向の収束力を若干補正する為の働きのみを持たせている。

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

以上の様に CW マイクロトロンの収束力でビーム試験開始後の調整パラメータは殆どない。実際のビーム試験では、初期パラメータで 5MeV 加速を実現できた。

(c) 周回ビーム位相調整

CW マイクロトロンで最も重要なのが周回毎の加速位相調整である。図 3.97 に示す様に、空洞通過によるエネルギー増加に従い電子の速度が速くなる。よって周回毎の周長を電子の速度に合わせて所定の値に制御する必要があり、従来のレーストラック形状のマイクロトロンの様な一様磁場の偏向電磁石では実現が難しい。CW マイクロトロンでは、前述した二分割変更磁石によって、図 3.98 に示す様に 2 段階磁場を発生させ、電子ビームの周長を調整している。偏向電磁石で 180 度偏向を行う必要があるので、偏向磁場が弱い部分 (弱磁場部分) は、強い部分 (強磁場部分) と比べて磁極が外側へ張り出した形状となる。図 3.99 に、TOSCA 計算磁場と実測磁場を使って計算した加速器左側のビーム軌道を示す。図中の点の集まりは実測した磁場分布を用いてシミュレーションした結果で、1000 個の粒子からなり、初期加速位相として 0° , $+10^\circ$, -10° とした。横方向のビームエミッタンスは 50 mm-mrad である。途中でのビームの広がりとアパーチャとの関係を考慮した計算の結果、位相幅 15 度のビームを 5MeV まで加速可能で、出射ビームのエネルギー分布は 1.4%(FWHM)、横方向サイズは全幅で水平 $\pm 18\text{mm}$ 、垂直 $\pm 12\text{mm}$ であった。

(d) 5 MeV ビーム加速

加速実験における周回毎の位相調整は、2 段階偏向電磁石の弱磁場部分にトリムコイルを配置し、弱磁場強度を微調することで実施した。図 3.100 に蛍光板モニタで観測された 5MeV ビームの様子を示す。図 3.101 にビーム加速実験で得られた加速位相とビーム電流の関係を示す。加速位相幅 20 度程度の電子ビームが加速できていることがわかる。現在の出射ビームサイズは水平 $\pm 25\text{mm}$ 、垂直 $\pm 4\text{mm}$ 程度である。軌道補正は実施しておらず、平衡軌道歪みの影響で電子ビームの一部が垂直方向のダクトに衝突している可能性がある。

現在、出力 1.4kW のビームが得られている。今後、平衡軌道歪みの補正を実施し、定格出力 50kW の大電流加速試験を行う。

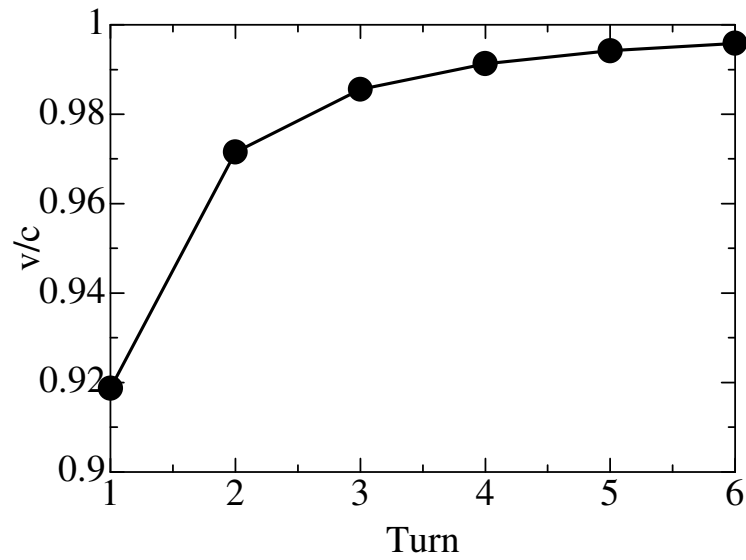


図 3.97: 周回毎の電子速度の光速に対する割合

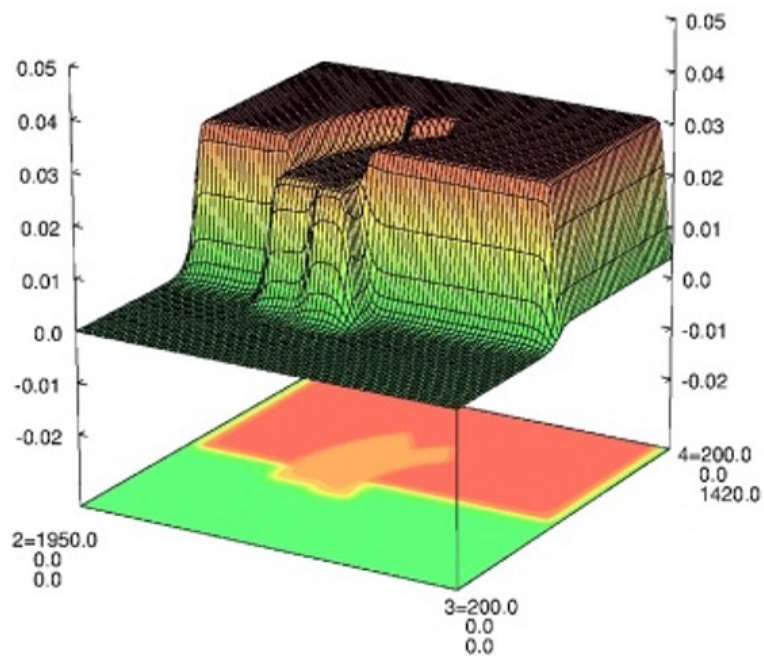


図 3.98: 偏向電磁石のビーム軌道平面上の磁場分布

3. 大出力電子線加速器 CW マイクロトロンの 500MHzRF システムの開発

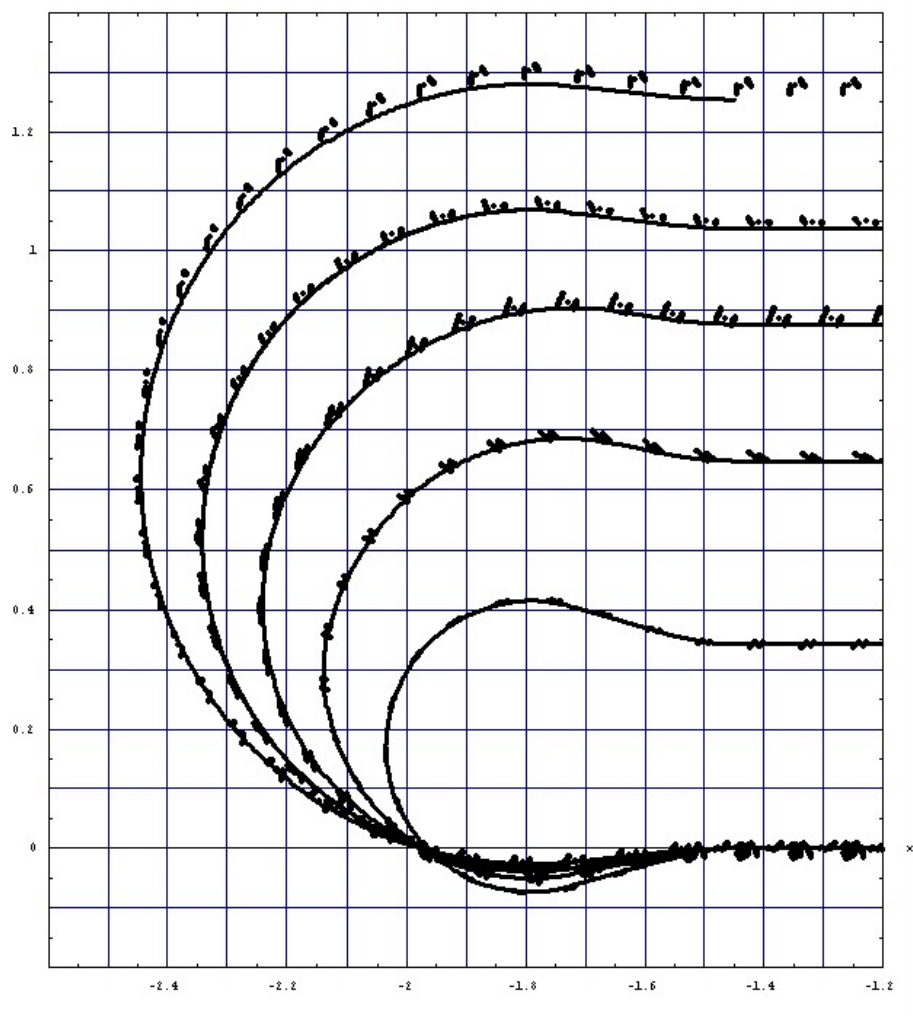


図 3.99: 計算磁場と実測磁場を使って計算したビーム軌道。実線が前者。後者は 1000 個の粒子の結果を点で示す (初期条件: 位相 $0^\circ, +10^\circ, -10^\circ$ 、エミッタンス $50 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$)



図 3.100: 蛍光板モニタで観測した 5MeV ビーム

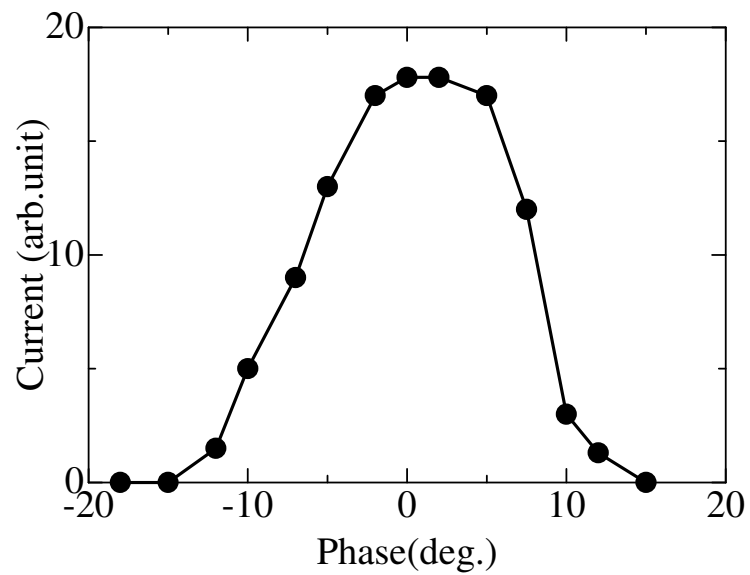


図 3.101: 加速位相とビーム電流の関係 (測定結果)

3. 大出力電子線加速器 CWマイクロトロンの500MHzRFシステムの開発

第 4 章

大出力電子線加速器による 食品照射ビジネスの実践

本章では、大出力電子線加速器 CW マイクロトロンによる一般消費市場創出を目的とし、食品照射事業への展開をターゲットとした事業化実践について論じる。はじめに、これまでに実用化された医療応用、工業利用分野について経営学的視点から考察を行う。次に、今回ターゲット市場とした食品照射市場に関する現状を説明し、新市場創出のための事業戦略について述べる。

4.1 技術および市場の経営学的考察

新規技術による新事業創出には常に不確定性が伴う。特に、既存技術により成熟した市場においては、技術、インフラ、顧客、事業構造等が比較的明確に定義されており、新規技術による参入には高い障壁が存在する。一方で、産業や市場の構造は脆弱であり、特に変化のない産業構造においては、あるきっかけを前兆として、瞬時に解体すると P. F. Drucker は指摘している [86]。また、Wharton School の G. S. Day らは、いまやどの産業においても次世代技術による従来とは異なったゲームをマネージすることが、企業における成功への必須条件であると述べている [87]。

ここでは、新規技術によるパラダイムシフトを破壊的イノベーションに基づいた論理構成によって上手く説明し、近年の技術経営学にインパクトを与えた、Harvard Business School の C. Christensen の破壊的イノベーションモデル [88][89] を用いて加速器技術全般の変遷を考察し、CW マイクロトロンによる一般消費市場創出に関する

4. 大出力電子線加速器による食品照射ビジネスの実践

経営学的考察を行う。

加速器技術の持続的な技術の進歩を C.Christensen が評価指標として用いた時間と性能の2次元上のグラフに表し説明すると、研究用加速器における技術と市場の変化は図 4.1 に示すようになる。尚、ここで言う市場は、加速器が研究用途で用いられていることから、該当する学术分野で言い換えることにする。

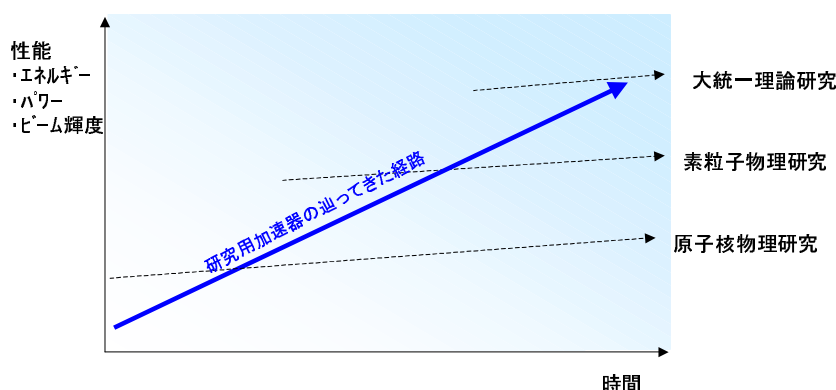


図 4.1: 加速器技術と研究用加速器市場の変遷

1930年代以降、粒子線加速器は主に原子核反応を人工的に発生させるための機器として広く利用された。その結果、主に原子核物理を対象に加速器の性能は持続的な発展を示した。そして1980年代には、新たに素粒子物理用途の需要が出現した。これに伴い粒子線加速器の高エネルギー化が進み加速器技術は更なる技術革新を遂げた。そして、今日では更に大規模な加速器の需要が出現している。これらの技術革新はエネルギー、パワー、ビーム輝度を性能上の指標として、上位の市場へと展開している。

次に、加速器技術が応用された医療、工業利用分野について“ The Innovator’s Solution ”[90][91] で述べている第三軸を加えた別次元への展開事例としてとらえ、同様な考察を行う。ここで性能を示す価値基準は研究用加速器で定義した性能ではなく、それぞれの用途において要求される性能を価値基準と定義して、性能と時間の2次元グラフに表した。性能の定義は C.Christensen が価値の評価基準として定義しているバリューネットワークの概念に基き、表 4.1 に示す項目とした。図 4.2 に別次元に展開した2次元グラフを示す。

表 4.1: 研究用途、工業利用、および医療応用で定義した性能尺度

用途	①研究用	②工業	③医療
性能	<ul style="list-style-type: none"> ・エネルギー ・パワー ・輝度 	<ul style="list-style-type: none"> ・加工性 ・操作性 ・生産性 	<ul style="list-style-type: none"> ・治療効果 ・信頼性 ・操作性

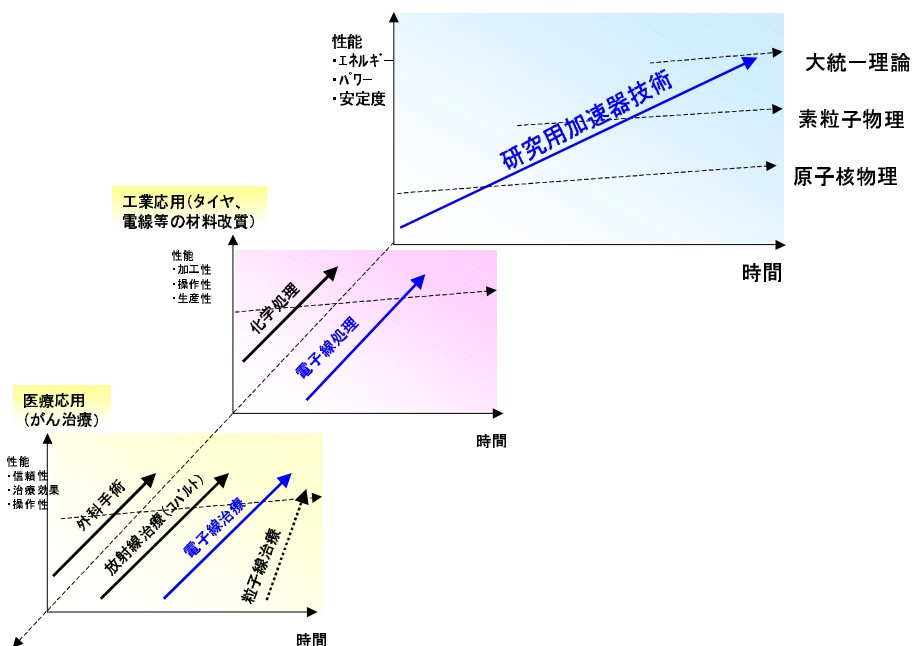


図 4.2: 加速器技術の異なるバリューネットワークへの展開

医療分野への展開例

はじめに、医療分野の展開例として放射線がん治療による技術と市場の変化を説明する。図 4.3 にがん治療市場における技術と市場の変化を示す。ここで図中のものは現在放射線治療が主流となっている特定の部位に関するがん治療を取り上げている。医療用途として要求される信頼性、治療効果、操作性を性能評価指標とした。

コバルト治療法の実用化から、それまで手術等の外科治療法が主流であったものが大きく変わったことは言うまでも無い。その後、電子線加速器の発展に伴い、市場ではコバルト治療法から電子線ライナックによる治療法が主流になった。信頼性、治療効果は指向性を持つ電子ビームにより向上し、操作性に関しても、常に放射線を発生し、

4. 大出力電子線加速器による食品照射ビジネスの実践

放射線遮蔽材等による ON/OFF 制御が必要となるコバルトと異なり、ON/OFF 操作で自在にビーム照射と停止が制御可能になり向上していることが大きな理由として考えられる。更に、図中一点鎖線で示したように、治療効果を更に向上させた陽子ビームや炭素ビームによる粒子線治療法の適用が世界各国で進んでいる。今後破壊技術として更に展開する可能性が高いと考える。

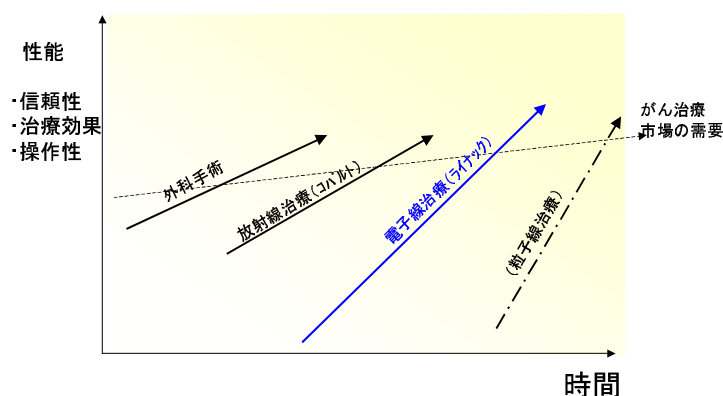


図 4.3: がん治療市場と治療技術の変遷

工業利用分野での展開例

同様に、工業利用分野での展開例を考察する。図 4.4 に同様な性能と市場の時間変化を示す。ここでは工性、操作性、生産性を性能評価指標とした。2章で記述した通り、電子線による架橋反応の発見により、従来の加工法を一新する形で電子線照射は、全性能指標において勝り、現在に至っている。

以上のように研究用加速器による技術革新の各市場への応用は、加速器技術を異なるバリューネットワークへ展開した、新市場破壊型の技術革新の事例にほぼ一致している事例であると考えられる。次に、このような展開を民生市場を対象に考える。

4.1 技術および市場の経営学的考察

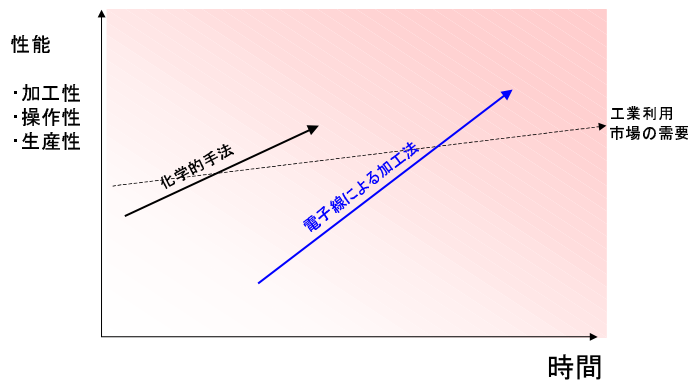


図 4.4: 工業利用市場と加工技術の変遷

食品照射市場創出の可能性

CW マイクロトロンによる食品照射市場展開予測を、時間と性能の2次元上のグラフを図 4.5 に示す。民需市場である性質上、バリューネットワークの指標としては、経済性、汎用性を重視した、出力、効率、コンパクト性を選択する。CW マイクロトロンはこれらの性能指標に関しては、従来の加速器システムと比べ、大幅に向上しており、性能の指標は市場の需要に追随したと考える。従って、本事例は医療および工業利用事例と同様な新市場破壊型技術革新を起こしうる事例であると考えられる。

次節以降では、食品照射技術に関する一般的技術を解説し、食品照射事業の実践のための戦略を構想する。

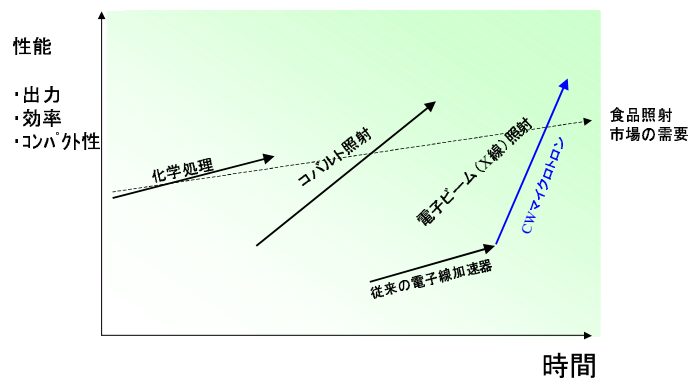


図 4.5: 食品照射市場と食品照射技術変遷の予測

4. 大出力電子線加速器による食品照射ビジネスの実践

4.2 食品照射とは

20世紀以降、地球上の人類は人口爆発により約65億人にまでに達した。それに伴い環境破壊や食料供給不足の問題が深刻になってきている。一方で、収穫後の食料は約25%程度が腐敗や害虫、病原性汚染により損失・廃棄が発生している。適切な貯蔵・殺菌技術を適用することにより、これらの食料は廃棄せずに食品としての利用が可能である。

食品照射とは電離性放射線照射による野菜などの発芽抑制や成熟遅延、殺虫や殺菌・滅菌のことであり、食品の貯蔵期間を延長し衛生化するための技術である。放射線の作用を利用した食品照射の研究は、第2次世界大戦後、貯蔵期間の延長を目的として各国で開始された。その結果、野菜の発芽防止、殺虫等に対する放射線の優れた効果が明らかになり、これらの研究によって、放射線照射は食品に対して成熟の遅延や、発芽抑制、害虫、病原性細菌、腐敗性細菌などの殺菌や滅菌等の多くの分野に適用可能で、冷蔵せずに長期間貯蔵することが可能であることが明らかになった。

放射線照射の特徴を以下に述べる。

- 透過力が強いので、包装済の最終製品に照射しても、殺菌・殺虫の効果がある。
- 照射による温度上昇は一般に最大2℃程度なので、冷凍食品の殺菌も可能となる。
- 栄養素の損失は、加熱の場合と同様に一部のビタミンが影響を受ける程度である。
- 連続処理が可能なので、大量に処理できる。
- 最終的には熱に変わって消失するので、残留の心配がない。

食品照射の健全性に関しては、放射線照射による誘導放射能、毒性物質、発がん性物質等の生成、栄養価の変化、照射食品による遺伝的影響について詳細な検討が戦後40年以上にわたってなされた。そしてFAO / IAEA / WHOの合同専門委員会は、総平均照射線量が10kGy以下であれば食品の健全性に問題はないと結論付けた[92]。

これをトリガとして食品照射の実用化が加速した。今日では食品照射は41カ国、117品目以上に認可が下り、また30カ国において実用化されている。表4.2に世界の食品照射の許可状況を示す。

照射で得られる効果は照射線量に依存する。表4.4に代表的なものを示す。

4.2 食品照射とは

表 4.2: 世界の食品照射許可の状況

地域	国名	照射食品											その他			
		スパイス	乾燥食材・食品	タマネギ	ジャガイモ	食鳥肉	卵製品	生鮮果実	ニビ	ニンニク	乾燥果実	赤身肉		米	小麦	冷凍食品
アジア・大洋州	日本				●											
	バングラデシュ	●		●	●			●	●	●			●			
	中国	●	●	●	●			●		●	●	●				
	インド	●		●	●	●			●	●			●		●	
	インドネシア	●		●	●				●	●			●	●	●	
	イラン	●														
	イスラエル	●	●			●		●			●		●			長期保存食
	大韓民国	●	●	●	●					●						
	パキスタン	●	●	●	●	●		●	●	●	●		●	●	●	
	フィリッピン	●		●						●						
	シリア	●		●	●	●		●					●	●		
	トルコ	●	●	●	●	●		●	●	●	●		●	●		
	タイ	●		●	●	●		●	●	●			●	●		発酵豚肉
	ベトナム	●		●	●											
	台湾	●	●	●	●	●	●	●			●					
オーストラリア	●															
西欧	アイルランド	●	●													
	オーストリア	●	●													
	ベルギー	●	●	●	●				●							
	デンマーク	●	●													
	ドイツ	●	●													
	ギリシャ	●	●													
	フィンランド	●	●													
	フランス	●	●	●		●	●		●	●			●	●	●	チーズ
	ハンガリー	●	●	●	●	●										ワインコルク
	イタリア	●	●	●	●					●						
	ルクセンブルグ	●	●													
	オランダ	●	●			●			●						●	病人食
ノルウエー	●	●														

4. 大出力電子線加速器による食品照射ビジネスの実践

表 4.3: 世界の食品照射許可の状況 (続き)

ポルトガル	●	●													
スペイン	●	●		●	●										
スウェーデン	●	●													
イギリス	●	●			●		●	●		●		●	●		病人食

地域	国名	照射食品													その他	
		スパイス	乾燥食材・食品	タマネギ	ジャガイモ	食鳥肉	卵製品	生鮮果実	エビ	ニンニク	乾燥果実	赤身肉	米	小麦		冷凍食品
東欧	ロシア			●	●	●		●						●	●	
	ウクライナ	●	●	●		●		●				●		●	●	穀類一般
	クロアチア	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	チェコ	●	●													
	ポーランド	●	●	●						●						
	ユーゴスラビア	●	●	●	●	●	●				●			●	●	
北米	カナダ	●	●	●	●									●		
	アメリカ	●	●		●	●	●	●		●	●			●	●	宇宙食
中米	キューバ	●		●	●			●	●							
	メキシコ	●	●	●	●	●	●		●	●			●	●		
南米	アルゼンチン	●	●	●	●					●	●					コブバグラー
	ブラジル	●		●	●	●		●					●	●		
	チリ	●		●	●	●	●						●	●		
	コスタリカ	●		●	●			●					●	●		
	ウルガイ				●											
77国	エジプト	●	●													
	ガーナ	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
	南アフリカ	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	長期保存食
照射食品毎の国の数		48	35	30	29	22	9	19	13	18	14	5	19	20	8	

出典：IAEAホームページ (<http://www.iaea.org/icgf/database>)、2001年現在

表 4.4: 食品照射の実用線量

照射目的	線量 (kGy)	対象食品
低線量照射 (1kGy 以下)		
(a) 発芽抑制	0.05 ~ 0.15	馬鈴薯、玉ねぎ、にんにく、生姜、他
(b) 害虫及び寄生虫防除	0.15 ~ 0.50	穀類、果実、乾燥肉、豚肉、他
(c) 成熟遅延	0.50 ~ 1.0	果実、野菜
中線量照射 (1 ~ 10kGy)		
(a) 貯蔵期間延長	1 ~ 3	鮮魚、いちご、他
(b) 殺菌	1 ~ 7	水産物、生肉、冷凍肉、他
(c) 食品特性改善	2 ~ 7	ぶどう (ジュースの収率向上) 乾燥野菜 (調理時間の短縮)、他
高線量照射 (10 ~ 50kGy)		
(a) 滅菌	30 ~ 50	病人食、肉、水産物、加工食品、他
(b) 食品添加物殺菌	10 ~ 50	香辛料、酵素製剤、天然ガム、他

4.2.1 マクロ的動向

ここでは食品照射技術に関するマクロ的市場動向について説明する。

食品原料の多くは腐敗、害虫による影響で収穫後の長期貯蔵が困難である。乾燥、塩蔵、発酵などの様々な貯蔵技術は古来より開発されてきた貯蔵手段であり、近年では加熱殺菌技術、冷蔵冷凍技術、薬剤処理技術の発達により食品の貯蔵性は飛躍的に進展した。しかし今日におかれても、前述の通り全世界では未だに食料の 25 % 以上が腐敗、害虫により損失しており、食中毒の被害は留まることが無い。図 4.6、4.7 に示す様に世界各国での食中毒の増加は、深刻な社会問題となりつつあり、英米では毎年 500 人が食中毒により死亡しており、これらの社会的経済損失は年間 6000 億円とも言われている [93][94]。

また、交通インフラの発達、国際間交流の活発化による食料輸入の拡大に伴い国内に生息しない害虫や病原菌の侵入が深刻な問題となり食品照射の担う役割は一層重要なものとなってくる。

4. 大出力電子線加速器による食品照射ビジネスの実践

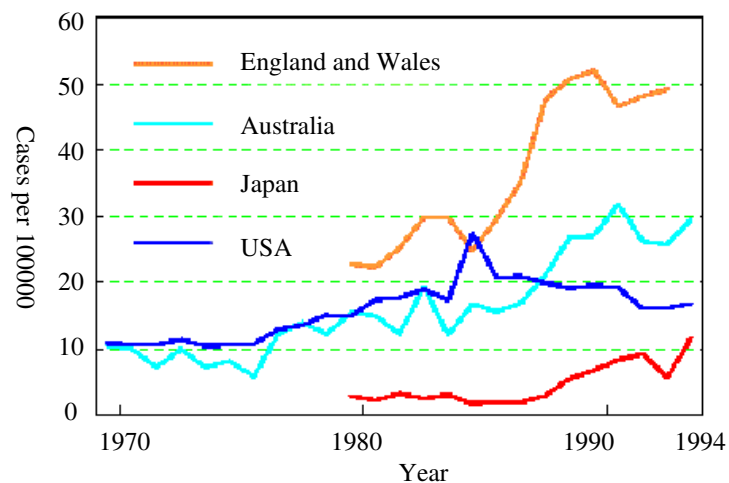


図 4.6: 先進諸国における食品由来のサルモネラ症の頻度 ([95]) より引用

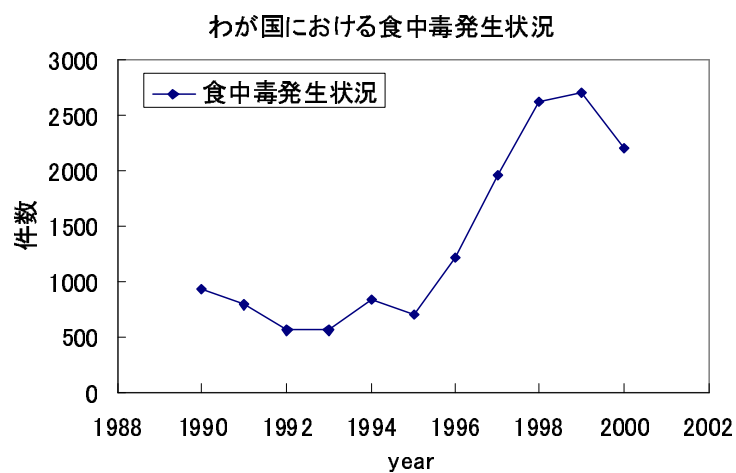


図 4.7: わが国における食中毒発生状況 ([96] より引用)

従来、食料の長期貯蔵や殺菌には二臭化エチレンや酸化エチレンなどの薬剤が用いられていた。しかし発がん性などの毒性物質が処理後残留するため食品への使用が禁止され、その後、臭化メチルや青酸ガスなどが殺虫および殺菌処理に用いられてきた。

しかしながら、臭化メチルにおいても毒性物質の問題は解決できておらず、更に、フロンガスと同様なオゾン層を破壊する有害物質でもある。この問題に対し、第9回モントリオール議定書締結国際会合において先進国での使用を2005年で禁止し、2015年に完全撤廃する事が決定された[97]。代替手段として考えられる低温処理、蒸熱処理は表4.5の特徴を示す。青果物の品質低下が著しく、また処理コストも高い。

以上のような背景から、米国をはじめとする世界各国において放射線照射による検疫処理を導入する方針が示されている。

表 4.5: 検疫処理法の比較

種類	臭化メチル	蒸熱処理	低温処理	放射線処理
透過性		×	×	
殺虫効果			×	
残留毒性	弱発がん性	なし	なし	なし
対環境性	オゾン層破壊	なし	なし	なし
品質劣化	損傷	損傷大	損傷有り	少
処理条件	密封 果実：2～48時間 穀類：1～7日	中心温度 50 7時間	中心温度 0.6 12日以上	連続処理 数秒
経済性		×	×	

4.2.2 各国の取組状況

以上のマクロ的動向における、各国の放射線処理法の取組みを述べる。

各国での食品照射技術の実用化の進展に伴い、食料貿易の場に照射食品が登場する事が予想される。こうした情勢から、照射食品についての国際的な認識の調整のため、1988年12月、ジュネーブで、FAO/IAEA/WHO/ITC-UNCTAD/GATTの共催により「照射食品の受容、管理、貿易に関する国際会議」が開催された。57カ国の参加国から、食品照射技術の利用の可能性に関して、食品衛生や食料保存の観点からの肯定的な意見や、安全性への懸念や反原子力に基く批判的な意見等が種々出され、最終的に食品

4. 大出力電子線加速器による食品照射ビジネスの実践

照射が特に固体食品の病原菌汚染を低下させ、食品に由来する病気を減少させる可能性を秘めている事、又、収穫後の損耗を減少させる事で、より多くの食品の提供が可能となる事、更に、植物防疫手段として農産物の貿易の促進に貢献する事等を確認し、表 4.2.2 に示すの勧告を採択した [98]。

表 4.2 に示した通り 2001 年の時点での食品照射の許可国は、41 カ国に達しており、許可品目は 100 種類以上に及んでいる。表 4.7 に各国の実用化状況を示す。香辛料、乾燥野菜、生薬、鶏肉、赤肉等の照射は約 30 カ国で行われており、全世界の照射量は年間 35 万トンを超えているものと推定される。

以下、欧米諸国での食品照射の取組み状況を述べ、今回事業ターゲットとする中国を含めたアジアでの今日の動向を述べる。

表 4.6: 照射食品の受容、管理、貿易に関する国際会議の勧告事項

-
1. 食品照射を適用する事が有効と思われる食品に対しては、国民の健康のために食品照射技術の利用を考慮すべきである。
 2. 食品照射が農産物の収穫後の損耗を減少させ、又、植物防疫の手段として有効である場合は、食品照射技術の利用を考慮すべきである。
 3. 食品照射の実施及び照射食品の販売の前提条件として、各国政府は食品照射及び照射食品の販売を管理するための規則を策定すべきである。特に、この規制には照射施設の登録、許可・管理、検査、照射食品に関する記録や表示、監督官の訓練、GMPの導入等に関する事項を盛り込むべきである。
 4. 食品照射を管理するための規制を策定する時には、その規制が照射食品に関する国際一般規格及び食品照射の実施に関する国際規範に盛り込まれた、国際的に合意された原則と一致するようにすべきである。又、食品照射を実施中は、各国及び国際的な規格で定めた線量測定を行ない、正当な照射が行なわれている事を示す証拠とすべきである。
 5. 各国政府は、照射施設を離れても行政による照射食品の管理が行なえるように、照射食品の検知技術の開発のための研究を実施すべきである。この事により、照射食品の貿易を促進し、食品照射の全体の管理システムに対する消費者の信頼が高まる。
 6. 貿易に供される照射食品の表示は、国際食品規格委員会の原則と一致したものであるべきである。
 7. 各国政府は、人間の健康、安全、環境の保護のために、食品照射施設の設計及び運転が国際的に合意された規格に合致した基準に従うようにすべきである。
 8. 各国政府は、特に食品照射を許可しようとしている政府は、食品照射について明瞭で適切な情報を提供するようにすべきである。その際、消費者団体を含むあらゆる関心を有している団体の参加を得るようにすべきである。
-

([98] より引用)

4. 大出力電子線加速器による食品照射ビジネスの実践

表 4.7: 食品照射を実用化している主な国

国名	食品類	推定処理量 (トン/年)
アルゼンチン	香辛料、乾燥野菜	740
ベルギー	香辛料、冷凍魚介類	15,000
カナダ	香辛料等	5,000
チリ	香辛料等	450
チェコ	香辛料等	1,200
中国	ニンニク、香辛料等	80,000 以上
フランス	香辛料、乾燥果実、鶏肉等	25,000
ハンガリー	香辛料等	1,000
インドネシア	香辛料等	4,000
イスラエル	香辛料等	1,200
日本	馬鈴薯	15,000
韓国	香辛料、朝鮮ニンジン粉末	3,000
オランダ	香辛料、冷凍魚介類、チーズ	30,000
メキシコ	香辛料等	4,600
ポーランド	香辛料等	400
南アフリカ	香辛料、ニンニク等	12,600 以上
タイ	発酵ソーソーシ、香辛料	1,000
ウクライナ	穀類	100,000 以上
イギリス	病人食、香辛料	若干量
米国	香辛料、牛肉、鶏肉、果実、等	60,000 以上
その他、約 10 カ国		

([99] より引用)

4.2.3 米国での動向

アメリカでは、1989年にUSDAのAPHIS(Animal and Plant Health Inspection Service:側植物検疫局)が、ハワイ産のパパイアをアメリカ本土に輸送するために、照射を植物検疫処理として適用するための法規制を出した。そして1993年にEPA(アメリカ環境保護局)は、検疫以外の目的での臭化メチルの使用と生産を廃止する最終案を提案した。これによって、臭化メチル蕉蒸の代替措置として放射線処理が有望であるという考えが一気に進んだ。それを受けて1996年にUSDA/APHISは、照射を植物検疫処理として導入する基本政策を発表した。[100]

また、ハンバーガーの挽肉が原因の大腸菌O157:H7感染で4人の死者が1993年に発生し、1997年には、大腸菌O157:H7汚染で、2500万ポンドのハンバーガーがリコールされるなどの食中毒事故が相次いで起こった。これを受けて、FDA(アメリカ食品医薬品局)は、1997年12月3日に赤身肉(red meat)の照射の許可を行った。

現在、アメリカではすでに年間3万トン以上の香辛料が放射線殺菌されており、最近では生鮮肉、青果物の照射も行われている。また、宇宙食、病人食においても照射による滅菌を行っている。

4.2.4 欧州での動向

1998年に欧州議会と閣僚理事会の調停委員会において「食品に対する放射線照射に係わるEC指令(案)」が合意に達した。照射に関する条件・施設の許可と管理・表示に関する規則などの全般的な骨子を定めた指令と、実施に関する指令の2つからなり、照射することのできる食品のリストが定められた。

ヨーロッパでは、フランスでは、1985年以来、冷凍鶏肉、香辛料、冷凍魚介類の大規模な照射が始められ、1997年に照射された食品の量は、おおよそ15,000トンとなった。その内の6,480トンがスパイス類、6,800トンが冷凍鶏肉、280トンがドライフルーツであった。

フランスからEU諸国への輸出も可能であるが、これには、EUの定めた照射施設のライセンスが必要であることと、表示が義務付けられている。オランダ、ベルギーでも香辛料や冷凍魚介類の放射線殺菌が行われており、他欧州諸国においても実用化が始まっている。また、ウクライナ(オデッサ)の電子線照射施設は、小麦の電子線殺虫

4. 大出力電子線加速器による食品照射ビジネスの実践

が稼動しており、小麦の入荷に伴って処理が行われている。

4.2.5 アジア諸国での動向

アジア地域においては、10カ国が食品照射の許可を出しているが、その形式、方法もまちまちであり、特に設定された最高・最低線量・表示についての統一性が欠けている。これらを克服して、この地域の中での統一した規格基準を設定することは非常に難しい問題であるが、1997年にASEANは、食品照射に関する統一規格基準の草案を策定した。1998年には、ソウルに、アジア・太平洋地域の14カ国の政府代表が集まり、食品照射についての統一規制を作るために、この草案についての協議を行なった。その結論として、IAEA・アジア原子力地域協力協定(RCA)に参加する17カ国は、この統一規制に則って、自国の規制を確立するように勧告が出されている。

実用化の面では、中国が食品照射を大規模に実用化している。2002年での年間処理量は10万トンを超え、毎年増えつつある[101]。中でも、にんにくは年間7万トン照射されており、香辛料、乾燥野菜等も大規模な照射が行われている。また韓国、インド、タイ、インドネシアでも実用化がすすみ香辛料、ソーセージ等の放射線殺菌が行われている。

4.3 食品照射ビジネスの実践

このような世界的動向から、放射線照射による検疫処理、殺虫・殺菌処理、いわゆる「食品照射」は、前述の食料問題の解決となる有望な技術として、今後一層注目されると考える。世界の先進諸国で食品照射を導入する方針を示しており、放射性同位元素であるコバルト 60 によるガンマ線照射による食品照射施設の導入が世界的に加速しており、更に、電子線加速器を用いた電子ビーム照射や X 線照射が、放射性物質を用いたガンマ線照射にとって代わる手段として、近年注目されている。

以下では、本論文前半の研究成果である大出力電子線加速器 CW マイクロトロンを用いた、食品照射および検疫事業への展開をターゲットとした事業化実践について論じる。上記問題が今後最も導入が加速していくと推測される中国での展開を試みる。また、中国ではこれまでコバルト 60 による処理施設のみ稼動していたが、今回新たに電子線加速器による照射処理事業を実践する。

4.3.1 事業コンセプト

本事業に関するコアコンピタンス、KFS は以下の通り。

- ・コアコンピタンス：加速器および照射システム開発技術および品質保証力
- ・新形電子線加速器 CW マイクロトロンを用いた食品照射システム

事業の特徴と優位性を示す骨組みを以下の 5W1H に示す。

表 4.8: 食品照射事業コンセプトの 5W1H

What	食品照射
Where & Whom	中国食料市場
How	フルターンキーシステムとしての装置販売
Why	国際規制に伴う食品照射ビジネスチャンス
When	2005 ~

また、本事業コンセプトを以下の様に設定した。

“ 環境にやさしい食品照射 ~ 電子線・X 線を用いた殺菌・殺虫照射処理 ~ ”

4. 大出力電子線加速器による食品照射ビジネスの実践

4.3.2 市場分析

中国は、建国以来、一貫して農業振興を最重要課題と位置付け、1970年代終わりから始まった改革開放政策を積極的に進める中で様々な改革に取り組み、農業・農村の発展を図ってきた。その結果、沿岸部を中心に農業の近代化が進み、沿岸都市周辺部の農村における大幅な所得向上などの成果を遂げた。

一方、農産物輸出についても、農業を外貨取得のための先進モデルとして位置付け、国内での生産過剰となっている穀物などの供給過剰緩和策として積極的に進められ、現在年間200億ドルを越える規模で実施されている。更に、山東省や浙江省などでは、輸出用農産物生産基地が次々に建設され、今後も生産が拡大する様相である [102]。

図 4.8 に中国での農産物輸出量の推移を示す。過去10年間に渡る中国経済の成長と同様、農産物の輸出は増加している。WTO 加入して1年目である、2002年の農産物輸出入状況に関しては、中国日本商会 [103] によると、輸出が大幅に伸び、輸入は昨年並みであり、特に食糧については、輸出が増え、輸入は減少し、小麦は初めて純輸出国になった。

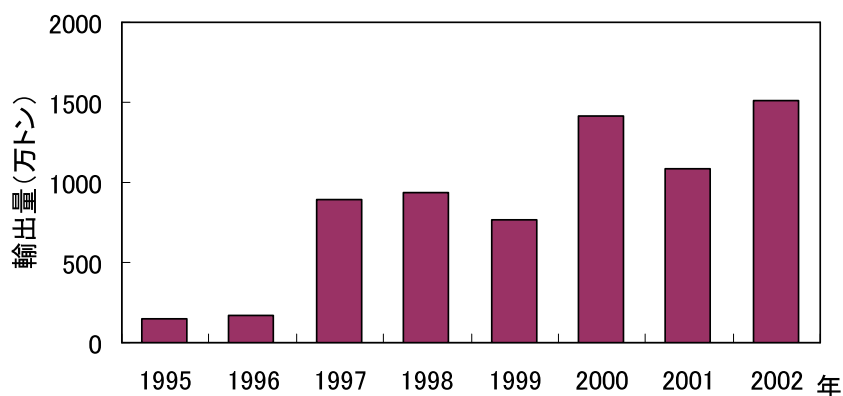


図 4.8: 中国農産物輸出量

以上より、筆者は中国での進出に事業性の価値があると判断し、事業戦略を策定した。表 4.9 および図 4.9 に中国における食品照射施設を示す。現在中国では照射施設は11箇所に16施設ある [104]。筆者は、これまでの推移、およびWTO 加入後の動向から、今後の食品照射に対する需要を図 4.10 に示す様に予測した。

表 4.9: 中国の食品照射施設 ([4-11] より引用)

Location (year)	Irradiation Material
Chengdu (1978)	Spices and vegetable seasonings, Chinese sausage, garlic.
Shanghai (1986)	Apple, potatoes, onions, garlic, dehydrated vegetables
Zhengzhou (1986)	Garlic, seasonings, sauces
Nanjing (1987)	Tomatoes
Jinan (1987)	Not specified
Lanzhou (1988)	Not specified
Beijing (1988)	Not specified
Tienjin (1988)	Not specified
Location (year)	Irradiation Material
Daqing (1988)	Not specified
Jianou (1991)	Not specified
Beijing (1995)	Rice, garlic, spices
Dalian (1998)	Not specified
Zhongshan (1999)	Not specified
Inner Mongolia (1999)	Not specified
Shuanglin (2000)	Not specified

4. 大出力電子線加速器による食品照射ビジネスの実践

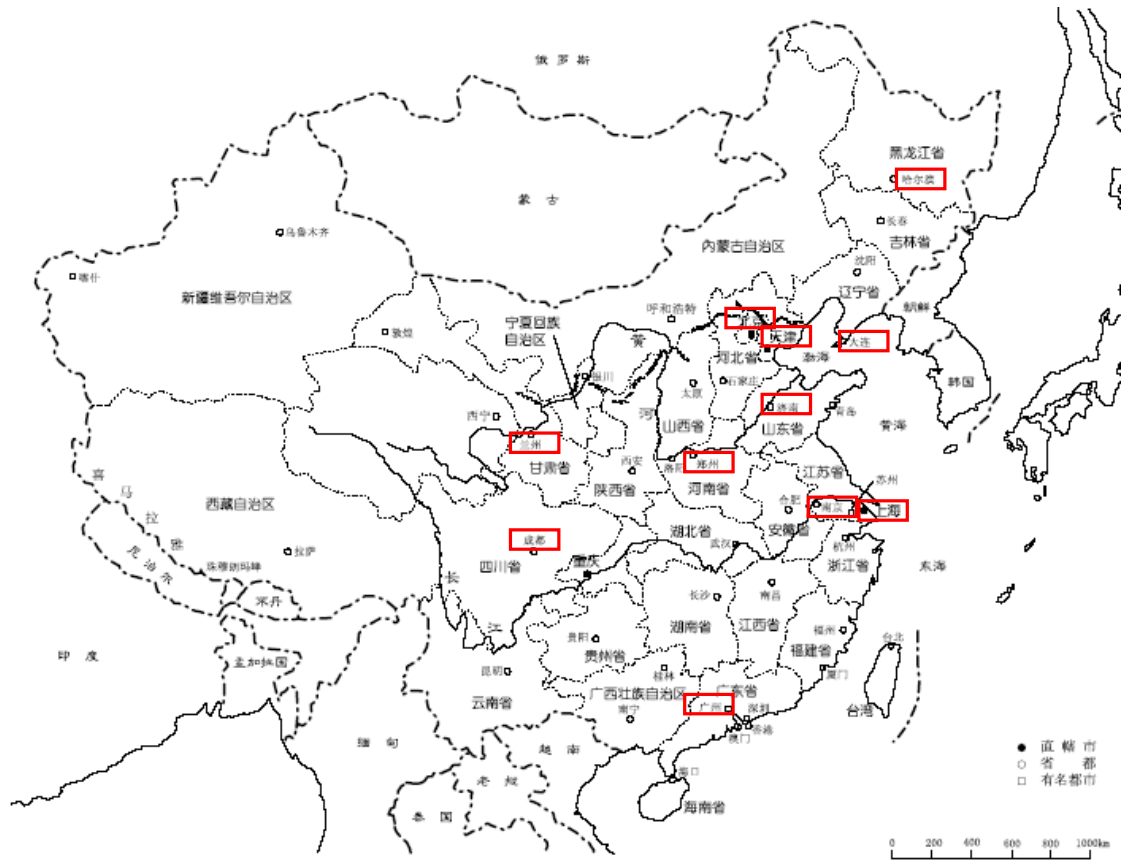


図 4.9: 中国の食品照射施設 ([105] をもとに筆者作成)

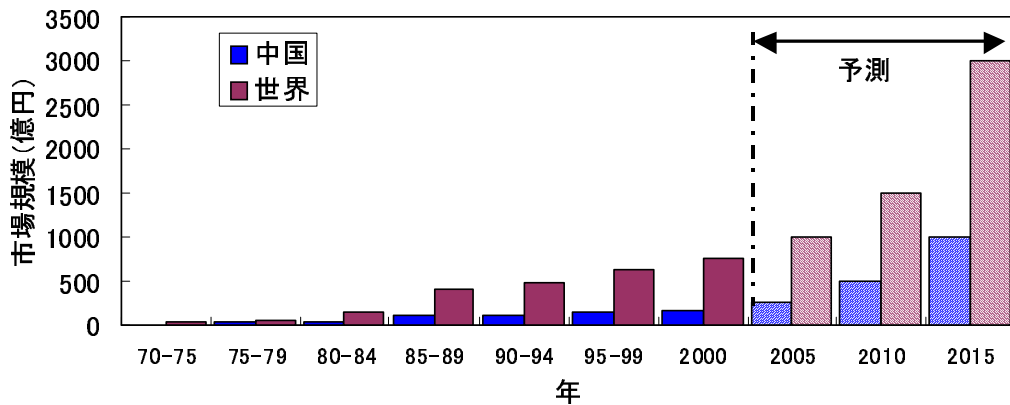


図 4.10: 中国および世界の食品照射市場規模 (筆者予測)

4.3.3 事業形態と推進戦略

次に適切な事業形態を決定する。想定される事業形態とその特徴を表 4.3.3 に示す。図 4.11 に加速器産業における各事業分野における顧客視点の特徴を示す。従来の研究用加速器産業における用途は、研究要素に対する要求が殆どであった。また、医療応用についても、収益性と同等に研究要素を問う配色が強い。一方、耐熱ケーブル等の工業利用に関しては、収益性の良否が買い手が関心を示す項目であった。

食品照射事業を上記枠組みでとらえた場合、工業利用と同様、収益性をキーファクタとする形態となることは明らかである。更に、物流という枠組みでとらえた場合、例えば図 4.12 に示した場合の流通チェーン [106] の 1 プロセスに組み込まれる形態や、あるいは図 4.13 に示す企業内におけるバリューチェーン [107] の枠組みで考慮した場合でも、同様に 1 プロセスとして組み込まれる形態が要求されると考える。

従って、上記考察から、③、④のような照射プロセス全体のトータルソリューションとして提供する形態が最も望ましいと考えられる。

表 4.10: 業実践時考えられる事業形態

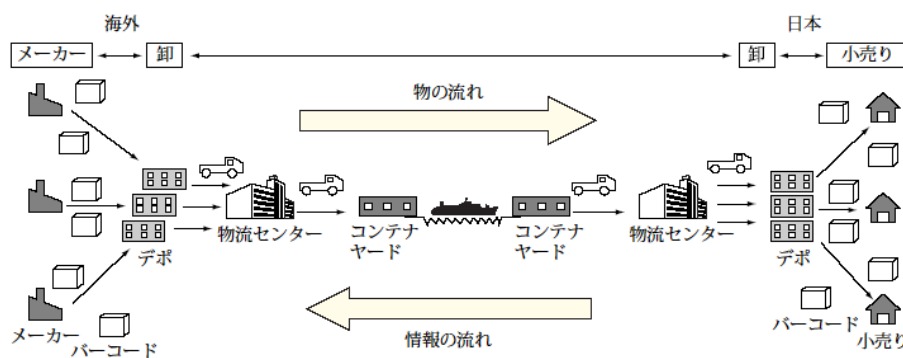
事業形態	内容	特徴
①機器売切り型	現地メーカー等へ加速器のみ販売	・現行事業の延長のみで対応可能 ・加速器関連以外の顧客への対応難
②システム売切り型	現地メーカー等へ加速器および搬送システム販売	・他事業部との抱合せ販売が可能
③ターンキー型	施設設計～導入～教育～保守業務の一連のサービス提供	・提供による顧客確保 ・新たな K/H の蓄積が要
④現地子会社設立型	現地に照射業者を設立し、～農協等を相手に照射業務を実施	・③より高い収益率 ・海外展開特有の事業リスク

4. 大出力電子線加速器による食品照射ビジネスの実践

	用途	顧客	Key Factor
これまでの事業	研究用	国立研究所	Research / Profit
	医療用	大型病院	Research / Profit
本事業	工業用	材料メーカ	Research / Profit

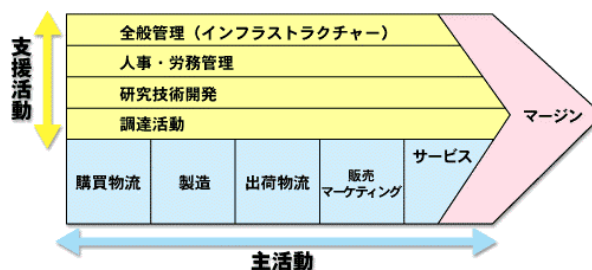
- ★装置価格と運転費用はミニマム
- ★装置は安定で、容易な運転(加速機器はブラックボックス化)
- ★運営が生み出す「利益」が最大であること

図 4.11: 研究用、医療用および照射用加速器事業における顧客分析



出所：IT ソリューションフロンティア, 野村総研 [106]

図 4.12: 発荷主から受荷主までの流通チェーン概略



出所：マイケルポーター「競争優位の戦略」[107]

図 4.13: バリューチェーンの1プロセスとしての照射事業

次に、市場での競争とそれに伴うリスクについて考察する。競争分析をMポーターの5フォースのフレームワークを用いて検討する [108]。図 4.14 に分析結果を示す。

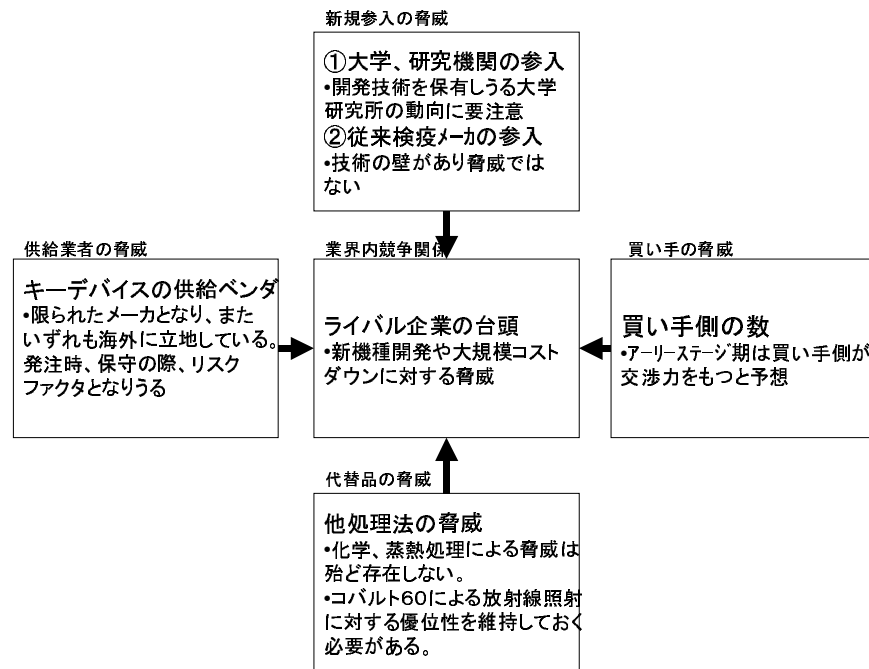


図 4.14: 5 フォースのフレームワークによる外部環境分析

業界内の競争関係については、加速器システムを扱う競合他社は複数存在するが、その中でも、大型ではあるものの大出力電子線加速器用いた食品照射システムを実用化している A、B、C 社については動向を注視しておく必要がある。C 社についてはその中でも着実に実績を積んでいる。コスト面では従来の倍以上の価格を設定しているが [109]、今後コストダウンを図ってくるとすれば脅威となると考えられる。

新規参入の脅威について述べる。本システムではキーデバイスとして電子線加速器が使用される。加速器、高エネルギー物理等に関連する大学、研究所等の学術機関では、放射線照射による滅菌・殺菌事業を注目しており、今後、国の支援のもと多大な研究予算を確保した研究開発が行われることが懸念される。近年の中国における産官学の連携や資金導入インフラ、いわゆるイノベーションシステムは、米国のシリコンバレーに並んで充実したシステムを保有している [110]。大学発起業の成功事例は多数あり [111]、学術機関からの業界参入が脅威となる可能性が高い。一方、上記大学をパー

4. 大出力電子線加速器による食品照射ビジネスの実践

トナーとして考える事でこれらの脅威は大きな機会ともなり得る。日米間では、加納らによる日米補完協業の考え方のもと成功した事例が幾つかあるが [112]、日中間においても車載機器メーカーである中村製作所の大連への事業展開成功例等があり [113][114]、いかにして良好な補完関係を確立するかがキーファクタとなる。

代替品に関しては先にも述べた通り、これまでの主要処理手段であった化学処理法は削減する方向にある。また蒸熱、低温処理についても処理コスト、処理能力、処理後の品質劣化等の観点から放射線照射に対する脅威にはならないと考える。よって放射線照射であるコバルト 60 による処理法が最も注視すべき脅威であると考えられる。

供給業者に関しても、システム全体の低コスト化を進めるにつれ、より脅威となりうると考える。特に RF 電源のキーデバイスである IOT 管に関しては、現在、供給業者が限られているので、リスクファクタの一つとして考えられる。またこれらの供給側は海外立地の企業でもあるので保守・メンテナンスが十分に維持可能な形態を構築しておく必要がある。買い手との関係は、海外への事業展開を行う上でのリスクが発生する。特に中国での事業リスクについては、販売・回収における旧社会主義計画経済のなごり、知的財産権問題、貧富の差が極端に大きい独特のマーケティングセグメント、外に厳しく内部に優しいダブルスタンダード等の独特のリスクが潜在する [115]。後述する香港、台湾大手多角化企業とのアライアンスによる事業形態では、特に市場が成長期に入る前のアーリーステージ期には買い手側が交渉力をもつと考える。買い手は価格の引き下げやさらなる品質向上を要求すれば、売り手の業界収益率は低下する。CW マイクロトロンのもつ差別加項目によって得られるベネフィットを明確にしておいて売り手側の交渉力を維持することが重要である。

以上の競争環境分析から、外部環境の概略が把握できた。次に事業のポジショニングを明確にするために SWOT による分析を試みた。表 4.11 に分析結果を示す。

内部環境分析によって得られた Strength (強み)、Weakness (弱み) について説明する。“強み”に関しては、加速器のトップメーカーでありトップクラスの技術水準を維持している。また、医療用加速器ライナック、粒子線がん治療装置のトップメーカーであり、ビーム照射、制御技術の面で競争力を有している。放射線照射においては、大出力電子ビームの安定した供給が要求されるので、これらの強みによる事業成功への期待は大きい。更に、CW マイクロトロンによる機能競争力および価格競争力を有し、競合する電子ビーム発生装置のみならず他処理手法と比較しても、十分な強みを発揮

表 4.11: CW マイクロトロンによる放射線照射ビジネスにおける SWOT 分析

S(強み)	W(弱み)
<ul style="list-style-type: none"> ・ 医療用加速器システムでの照射制御技術はトップメーカー ・ CW マイクロトロン競争力 (価格、機能) ・ 環境にやさしく、クリーンな処理手法 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 食品照射システムの導入実績無し。 ・ 搬送装置システムの実績が少ない ・ 販売ルートが弱い
O(機会)	T(脅威)
<ul style="list-style-type: none"> ・ 化学処理法 (臭化メチル) の撤廃 ・ 既存の照射施設の老朽化 ・ WTO 加入後の農業分野競争力強化 ・ ビジネスチャンスとしてとらえる資本家の存在 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 搬送装置に強い競合他社の実績 ・ 中国ローカルメカの参入 ・ 他処理方法の台頭

すると考える。

一方、“弱み”に関しては、実績および販売面で懸念される項目が挙げられる。第一には、コバルト照射を含め、食品照射システムの導入実績が無いこと、実用プラントに必須である搬送装置系の実績が少ない点である。競合他社の一部には加速器単体としては目立たないものの、搬送装置やその他の付帯設備等でトップメーカーである場合がある。また、販売ルートに関しても強固な販路を構築出来ていない。これに関しては中国ローカルメカを除く全ての競合他社についても同様な位置にいると考える。また現在のところ、実用的な大出力電子線加速器を有するローカルメカは出現していない。いずれの場合にしても、早期のうちに実績を付け、これらの弱みを解消する必要がある。

次に外部環境分析によって得られた Opportunity (機会)、Threat (脅威) について説明する。

先ず“機会”についてだが、臭化メチル撤廃の時期、既存のコバルト照射施設の老朽化が考えられる。臭化メチル撤廃は 2015 年であり、それを見据えた施設の移行が行われていくだろうと考える。また中国における現存するコバルトによる放射線照射施設に関しては、現在半分程度が築 15 年を経過しており、これに伴う施設の入替等が期待できる。また WTO 加入後の中国の農業強化に対する中国官民の積極的な設備投資

4. 大出力電子線加速器による食品照射ビジネスの実践

に期待できる。

次に“脅威”に関しては、第一に“弱み”で述べた運搬装置に強い競合他社の台頭が考えられる。搬送装置は照射施設のキーデバイスのひとつであるので社内の他事業部との連携によって搬送系の技術導入を実施する。第二には、中国ローカルメーカーの参入である。ハードウェア以外の流通システムとしてのK/Hを蓄積し、優位性を維持しておく必要がある。更に他処理法に関しては、今のところ特に目立った有力候補は無いが他手法を用いた処理法に関しても注視しておく必要がある。

以上の分析結果を踏まえ、照射施設全般をターンキーシステムとして販売する形態を本事業の形態として策定する。また、施設導入前検討からのサポートを含めた形態も有効である。図4.15に形態のバリューチェーンを示す。運営形態については、香港や台湾も含めた中国系の大手コングロマリット企業とのアライアンスを想定し、海外事業におけるリスクをヘッジする。図4.16にその概略を示す。

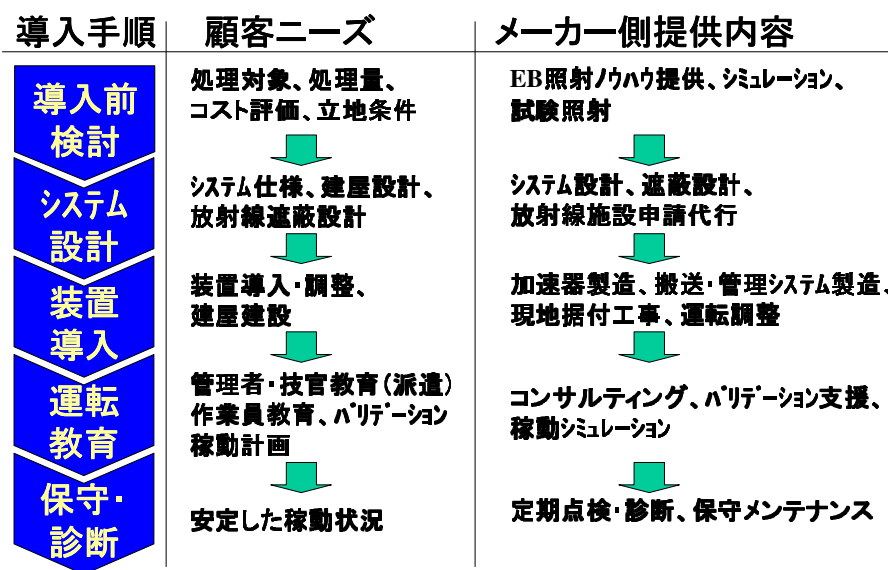


図 4.15: 照射ビジネスの事業フロー

4.3.4 事業の経済性評価

食品照射プラントとしての経済性評価を行う。表4.2で示した各検疫処理法のうち同様な放射線照射処理法である、コバルト照射処理法との比較を行う。

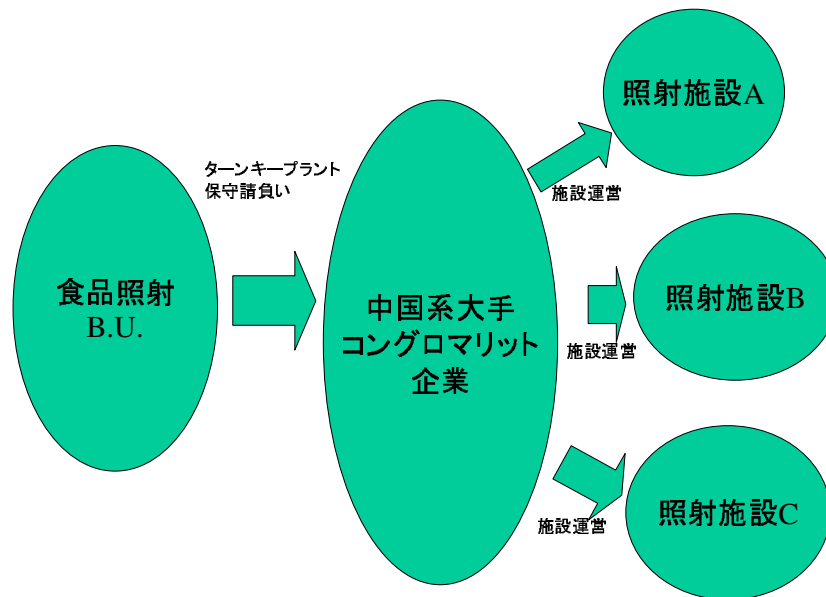


図 4.16: 照射ビジネスの事業形態

第一の比較としては両手法による処理コストを分析した。電子線加速器による処理プラントおよびコバルトによるガンマ線照射プラントの処理コストについて比較した。次に、算出したコバルト施設での照射処理単価とした際の、CW マイクロトロンによる電子線照射プラントの採算性を、ディスカウントキャッシュフロー（DCF）法を用いてIRR、PBP等を分析する。分析の際、コバルトおよび照射施設による処理コスト分析を土幌のじゃがいもプラントを例に行った。土幌プラントの詳細なデータは文献[116]から引用した。プラントの施設費用、運転費用の内訳は米国での電子線照射について厳密に採算性を評価している参考文献[34]をもとに作成した。また、中国におけるレート換算はJETRO調査による大連での各種レートを用い[117]、資本コスト、物価上昇率その他は、参考文献[118]での値を踏襲する。表4.12に各種前提条件を示す。

回収期間を15年間と設定し、プラント稼働時間は250 days/yr、8h/dと仮定した条件下で処理単価を算出した。結果を表4.13に示す。CW マイクロトロンを用いる事で処理単価が約半減する事が判った。

更に、コバルトプラントでの照射コストを処理単価と仮定し、上記と同様に年間プラント稼働時間を250 days/yr、8h/dと設定した場合の両照射プラントのキャッシュフ

4. 大出力電子線加速器による食品照射ビジネスの実践

表 4.12: 事業採算性評価における各種前提条件

資本コスト	10 %	工場従業員賃金	10000 円 / 月
コスト年間上昇率	5 %	エンジニア、マネージャ賃金	20000 円 / 月
販売価格年間上昇率	5 %	土地購入価格	5000 円 / m ²
法人税率	50 %	電気料金	8 円 / k W
設備耐用年数	15 年	水道料金	30 円 / m ³

表 4.13: 両プラントでの照射処理単価比較

手法	Co-60 による照射	CW マイクロトロンによる照射
処理単価比	1.0	0.49

ローを作成し IRR (内部収益率)、PBP (回収期間) を比較した。結果を表 4.14 に示す。

上記分析結果によると CW マイクロトロンによる照射プラントを使用することで回収期間は半分の期間で達成する事ができ、内部収益率もおよそ倍の値を確保できる結果を得ることが出来た。現行のコバルトプラントの置き換えに関しては十分実施価値のある結果が得られた。

表 4.14: 両プラントでの採算性評価結果

コバルト照射プラント		CW マイクロトロン照射プラント	
PBP	15 年	PBP	8 年
IRR	10 %	IRR	19.20 %

4.3.5 事業展開戦略

事業展開戦略は表 4.15 に示す 4 段階を想定している。各ステージの概略を纏める。

まずシード期に関しては、主に技術開発のフェーズとした。技術開発項目である CW マイクロトロンの開発に重点をおいている。同時に市場展開のためのビジネスパートナーを見つけるためにも重要なフェーズである。

次にアーリーステージ期では既存のコバルト施設のスイッチングを目標に展開する。築 15 年以上の老朽化の進んだコバルト照射施設は 16 施設中 11 施設あり、このフェー

表 4.15: 各事業ステージ概略

シード期 (～2004)	アーリーステージ期 (2005～2010)
技術開発 ・照射用新形加速器の開発 市場展開 ・主となるパートナーの探索	技術開発 ・照射システム技術構築 ・海外フルターンキーサービス供給K/H蓄積 市場展開 ・Co-60施設のスイッチング
成長期 (2010～2015)	成熟期 (2015～)
技術開発 ・処理作業の効率化 ・10MeV機(上位機種)のラインナップ 市場展開 ・中国東部農業基地等への展開 ・肉等の食料品照射事業への展開	技術開発 ・更なる汎用化のための超小型加速器開発 市場展開 ・西部内陸地区への展開 ・周辺諸国、日本国内への展開

ズでは主に実績を得る機会でもある。交替投資による優位性は前節に示した通りであるが、照射ビジネスをスタートして間もない時期であるので如何にノウハウを構築していく事が重要な時期である。

第3ステップの成長期は、主に農産物の検疫処理施設として展開する。臭化メチル全廃は2015年であり、これに備え代替手段への入替えが注目される。尚、先進国に関しては2005年から消費・生産を全廃するとされている先進各国に関し、わが国をはじめ米国などで、不可欠用途(代替困難で特例として使用が認められる用途)申請がなされている。一方、臭化メチルの撤廃と同時に、中国の食料貿易が成長していくフェーズでもあることを忘れてはいけない。東部における、農業基地の顕著な発展が見込まれる。よって東海岸に立地する植物検疫施設や農業基地へのアプローチを重点的に行っていく。また、同様に食肉の照射処理による殺菌についても市場動向に応じ展開の可能性はある。技術課題としては加速エネルギー10MeVとした上位機種の開発や、照射効率向上のための周辺装置開発を行っていく。

更に第4ステップの成熟期には中西部開発、コールドチェーンの発達していない地

4. 大出力電子線加速器による食品照射ビジネスの実践

域に至るまでの流通チェーンへの展開である。放射線照射によって得られる発芽抑制、成熟抑制によって産地立地型の放射線処理施設としての展開を考える。冒頭にも述べた様に中国農業の課題の一つに中西部の開発による中国農業二極化の解消は中国にとって意義深い。更にこのフェーズでは周辺諸国についても展開を進めていく。技術開発項目としては、更なる普及を目指した超小型加速器の実用化である [119]。

以上の展開戦略により事業の収支計画としては図 4.17 に示す目標と設定し、5 年目で経常利益累積値が黒字となると見込んだ。

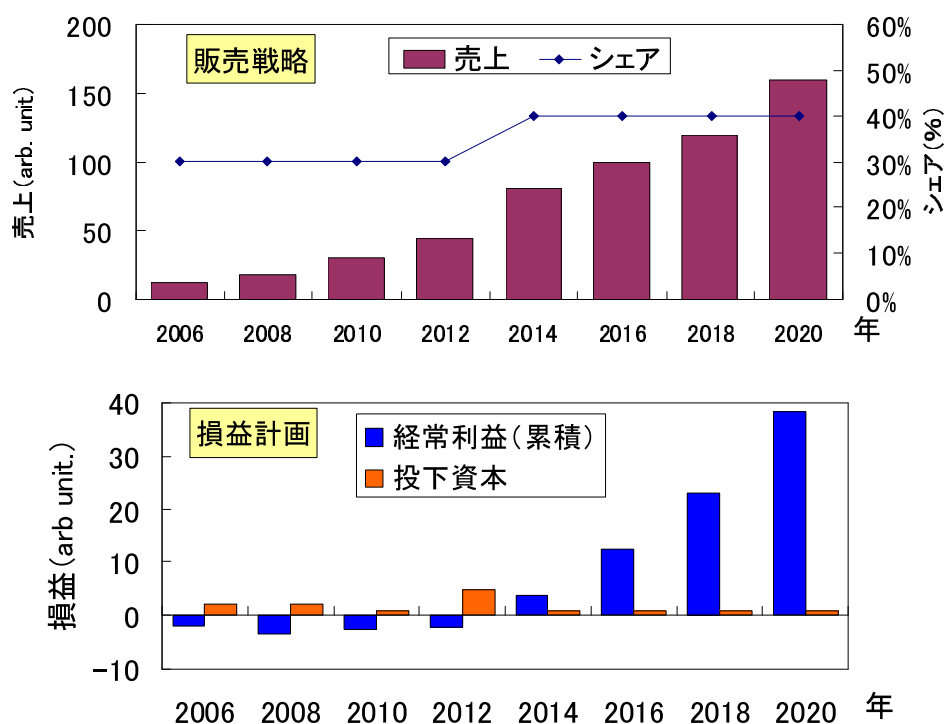


図 4.17: 目標事業規模

第 5 章

結論

これまで科学技術振興を中心として活躍してきた加速器産業において、一般消費市の創出を目的とした、大出力電子線加速器技術の RF システムに関する基礎的研究および、食品照射事業の実践についてを本論文で述べた。研究成果を総括して、本研究の結論を述べる。

第 1 の「序論」では、1930 年代に粒子線加速器が原子核実験を目的に作られ、これまで科学技術振興を中心として貢献し、現代物理学の発展とともに大規模化してきたことを述べた。また、加速器技術の発展に伴い、原子力分野、医療分野、および工業利用分野に関するこれまでの具体的貢献を述べた。

第 2 章の「電子線加速器の工業的実用化に関する現状」では、電子線加速器の工業的実用化の現状を述べた。その中でも、自動車タイヤ、配線用電線の材料改質に代表される主な利用分野に関し、従来处理手法と経済的視点から比較した結果、従来手法と比べ、何れの用途に関しても電子線処理法が優位であることを示した。

しかしながら、滅菌や殺菌等に応用される加速エネルギー 5MeV 以上の高エネルギー電子線加速器においては、加速器自身や周辺設備の顕著なコスト増加によって、今日に至るまで十分な市場普及を示していないことを示し、課題としては電子線加速器の大出力化、高効率化、コンパクト化、および低コスト化であり、そのための研究開発の必要性を述べた。

5. 結論

第3章の、「大出力電子線加速器 CW マイクロトロン の 500MHzRF システムの開発」では、一般消費市場創出を目的として考案した、大出力電子線加速器“ CW マイクロトロン ”の概要を述べた。本研究は、キー技術の一つである 500MHz RF システム構築のための研究開発についてであり、以下に示す研究成果を得たことを示した。

1. 500MHzRF 加速空洞の高周波特性最適化技術の構築

従来のマイクロトロンに一般に用いられていた S-band 帯 (2.8GHz) の RF システムに対し、CW マイクロトロンでは 500MHz 帯の RF 周波数を採用し、大出力化の際に主な問題である熱的問題を解決した大出力 RF 加速空洞を開発した。

低エネルギーで入射した電子ビームの加速時の速度変化を考慮した、高周波解析加速シミュレーション手法による、RF 加速空洞形状最適化手法を確立した。

また、低電力試験用空洞の試作が高周波特性検証のために通常よく行われるが、本設計では直接実機を簡単に製作するために、加速空洞の 3 次元構造、製造誤差等を厳密に考慮した設計手法を構築した。

2. 空洞の熱構造的特性の最適化技術の構築

大出力運転時に懸念される加速空洞の熱歪みによる共振周波数シフト、応力分布等を厳密に見積り、大出力機として問題無い空洞構造を決定した。

3. 加速空洞の製作技術

高周波および熱構造設計により形状を決定し、加速空洞の設計を行った。今回は従来よく行われる低電力試験用空洞の試作を行わず、直接実機空洞を製作した。

4. 加速空洞の特性検証

製作した加速空洞の低電力および大電力試験を行った。低電力試験では共振周波数、Q 値に代表される高周波特性を測定した。その結果、共振周波数は設計にて予想した誤差範囲内で良好に一致し、Q 値は理想値の 95% で一致し、本高周波設計手法の有効性を確認した。

大電力試験では、加速器定常運転時の空洞内消費電力 40kW を達成し、空洞外壁温度上昇および空洞共振周波数シフトも設計値と概ね一致し、本熱構造設計手法が大出力 RF 空洞を設計する上で何ら問題ないことを確認した。

5. RF システムの構築

IOT 管を用いた RF 電源、サーキュレータを用いない同軸管による RF 伝送系によるコンパクト化、大出力化を実現した。RF 空洞の共振周波数補正用の可動チューナにおいては、RF 空洞の共振周波数調整後にチューナ全体長を決定することで、チューナ部のコンパクト化することが出来た。

市場への普及を考慮した加速器システム全体の構成を検討し、大幅な低コスト化を可能にするための自己遮蔽型システムについての構成を検討し、全体コストの低コスト化のためのシステム構成の一案を述べた。

6. ビーム加速試験

これらの RF システムを組合せての RF 加速管の大電力試験では、大出力化に必要なとする要求を満足する結果を得た。更に、電磁石、電子銃、ビームモニタ等の他のサブシステムと組合せてのビーム加速実験を行い、加速エネルギー 5MeV の出射を確認した。

第 4 章の「大出力電子線加速器による食品照射ビジネスの実践」では、これまでの加速器産業を振り返り、がん治療に代表される医療応用の例、および電子線加速器の工業応用の例を経営学的に考察し、これらが C. Christensen のいう「新市場破壊」の事例と類似した事例である事を指摘し、CW マイクロトロンによる食品照射・植物検疫事業への展開が「新市場破壊型技術革新」を高い可能性で生み出すことを示した。

そこで、食品照射が実用化した 1970 年から現在に至るまでの食品照射市場における、世界的動向および中国での動向を述べ、今後の中国における市場成長を予測し、事業化戦略を策定した。これまでの研究および医療用途とは異なる顧客であることに留意し、適切な事業形態を検討した結果、食品照射を導入前検討から導入後保守診断までの全てをトータルソリューションとして提供する形態が望ましく、且つ中国系コングロマリット企業等との協業が適切であることを示した。また本事業を財務的視点からの考察として、従来行われてきた化学処理法の代替処理法として有望視されているコバルトによる照射処理法と CW マイクロトロンによる照射処理法をディスカウントキャッシュフロー法により比較し、事業価値を分析した結果、同一経営条件下では採算性のある有望な事業であることを確認した。

これらの研究を通じて、学術振興の牽引、原子力、医療および工業利用を中心とし

5. 結論

て担ってきた加速器産業において、新たに一般消費市場創出を実現するための技術的課題は解消され、有望な事業戦略が策定されたと考える。現在これらの実現を目指し、事業化実践を進めている。

謝辞

本研究を進めるにあたり、絶大なご指導を賜りました高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻 起業家コース長の加納剛太教授に御礼の言葉を申し上げます。本論文の内容について多くのご討論、ご教示を賜りました大阪大学工学部（前大阪大学レーザー核融合研究センター長、現高知工業高等専門学校校長）の中井貞雄名誉教授、高知工科大学大学院 起業家コースの馬場敬三教授、阿部俊明教授、大阪大学工学部の濱口智尋名誉教授に厚く御礼申し上げます。

三菱電機株式会社におきましては、先端技術総合研究所 電機システム技術部の小山健一部長、同前部長の中村史朗博士、山本俊二博士には本研究の遂行に当たり、温かい御理解、御支援を頂きました。この場をかりて御礼申し上げます。

さらに同研究所同部量子装置グループの前グループマネージャの中西哲也博士、現グループマネージャの築島千尋博士には直属の上司として研究現場での指導、協力頂きました。また、同グループの田中博文博士、蒲越虎博士、丸山昭彦博士、金太炫氏には、常に研究内容について議論し、協力、激励頂きました。ここで御礼申し上げます。

また、本研究遂行にあたっては、松下電器産業株式会社国際商事本部の松山丈夫本部長、池田達也氏、TNO コンサルティングの武野昭社長、株式会社ケイムの石橋誠二副社長、ならびに高知工科大学大学院 起業家コース大阪教室の皆様には、起業工学的観点において議論し、助言、激励頂きました。この場をかりて御礼申し上げます。

最後に、高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻 起業家コース博士課程進学を応援してくれ、3年間心の支えとなってくれた妻 可奈子と、いつも無邪気な笑顔で励ましてくれた娘 陽奈子に心から感謝します。

謝辭

参考文献

- [1] M. Stanley Livingston and John P. Blewett, "Particle Accelerator, "McGraw-Hill, NY, pp.6, (1962)
- [2] Alexander Chao, et al. " 2001 Snowmass Accelerator R&D Report, "eProceedings of Snowmass 2001, eConf C010630 SLAC-R-599 MT1001, pp.8, (2001)
- [3] 内閣府原子力委員会, " 加速器の現状と将来, " pp.1-2, (2004)
- [4] F. Maekawa, M. Wada, C. Ichihara, Y. Makita, A. Takahashi and Y. Oyama, " Compilation of Benchmark Results for Fusion Related Nuclear Data, " JAERI-Data/Code 98-024, (1998)
- [5] U. Fischer, Y. Oyama, F. Maekawa, C. Konno, M. Wada, C. Ichihara, Y. Makita, and A. Takahashi, " Integral Benchmark Tests of the FENDL1 Nuclear Data Library, " Fusion Eng. and Design, Vol.37, pp.9-21, (1997)
- [6] 原研・K E K 共同推進チーム, " 大強度陽子加速器計画, " JAERI-Tech 2000-03, (2001)
- [7] 森義治, " エネルギー増幅研究 (加速器開発), " 原子核研究, Vol.47, No. 6, pp.60, (2003)
- [8] H. Takahashi, " Induction FFAG for Accelerator Driven Reactor, " Proc. of 16th International Conference on Cyclotron and Their Applications, no.208, pp.208-210, Michigan, USA, (2001)
- [9] 田川精一, " 日本における加速器の現状 (その 1), " Journal of Particle Accelerator Society of Japan, Vol.1, No.1, pp.32, (2004)

参考文献

- [10] "GE Imatron, " http://www.geimatron.com/02_C300.htm
- [11] T. Ogino, " The project of proton treatment facility of the National Cancer Center, " Jpn. J. of Med. Phys., Vol.17, No. 2, pp.100-108, (1998)
- [12] A. Higashi, et al., " The Project of Hyogo Hadron Therapy Center, " Jpn. J. of Med. Phys., Vol.17, No. 2, pp.94-99, (1998)
- [13] 木村健二郎他, " インハウス型小型照射装置の紹介, " 防菌防黴, Vol.31, No.3, pp.140-158, (2003)
- [14] 勝村庸介, " 電子線加速器の動向, " 放射線と産業, No.77, pp.10-14, (1998)
- [15] 田中隆一他, " 放射線加工と加速器の小型化, " 原子核研究, Vol. 48, No. 5, pp.33-36, (2003)
- [16] A. Charlesby, " Atomic Radiation and Polymers, " Pergamon Press, Oxford (1960)
- [17] 柳澤和章, 久米民和, 幕内恵三, " 放射線利用の経済規模, " RADIOISOTOPES, Vol.50, No. 11, pp.581-590, (2001)
- [18] 柳澤和章, 久米民和, 幕内恵三, " ゆとりある国民生活に貢献する放射線, " 放射線と産業, No. 88, pp.46-53, (2001)
- [19] Seiichi TAGAWA et al., " Economic Scale of Utilization of Radiation (I): Industry Comparison between Japan and the U.S.A., " J. of Nucl. Sci. and Tech., Vol.39, No. 9, pp. 1002-1007, (2002)
- [20] Tamikazu KUME et al., " Economic Scale of Utilization of Radiation (II): Agriculture Comparison between Japan and the U.S.A. , " J. of Nucl. Sci. and Tech., Vol.39, No. 10, pp. 1106-1113, (2003)
- [21] Tomio INOUE et al., " Economic Scale of Utilization of Radiation (III): Medicine Comparison between Japan and the U.S.A. , " J. of Nucl. Sci. and Tech., Vol.39, No. 10, pp. 1114-1119, (2003)

- [22] Kazuaki YANAGISAWA et al., “ An Economic Index regarding Market Creation of Products Obtained from Utilization of Radiation and Nuclear Energy (IV)Comparison between Japan and the U.S.A. , ” J. of Nucl. Sci. and Tech., Vol.39, No. 10, pp. 1120-1124, (2003)
- [23] 谷口周一, “ インハウス小型照射装置の紹介 (その1) , ”防菌防黴, Vol.31, No.3, pp.144, (2003)
- [24] 四本圭一, “ 照射用電子加速器の設置, ” 放射線利用技術試験研究データベース, (1999), <http://www2.rada.or.jp:8180/member/detail/010192.html>
- [25] 小寺正俊, “ 電子リニアックの種類と構造, ” 放射線と産業, No.55, pp4-10, (1992)
- [26] 小笹公嗣, “ 中部電力における電子ビーム排煙処理プラント建設の状況, ” 第8回放射線プロセスシンポジウム講演要旨集, pp.13-16, Tokyo, (2000)
- [27] 青木慎治, “ 中国成都火力発電所における電子ビーム排煙処理プラントの運転成果, ” 第8回放射線プロセスシンポジウム講演要旨集, pp.17-20, Tokyo, (2000)
- [28] 水澤健一, “ 環境問題のソリューション = 放射線, ” 放射線と産業, No.91, pp.18-22, (2001)
- [29] 新井英彦, “ 新たな期待高まる放射線による水処理技術, ” 放射線と産業, No.82, pp.22-25, (1999)
- [30] 細渕和成, “ 医療用具, ”放射線滅菌の現状と展望、日本アイソトープ協会、丸善、pp.16-38、(1998)
- [31] 須藤高史, “ 電子照射処理と電子加速器の利用の現状, ” 放射線利用技術試験研究データベース, (2000), <http://www2.rada.or.jp:8180/member/synopsis/010213.html>
- [32] K. Doi, “ Economical Aspects of Industrial Electron Accelerators, ” Proc. of the Workshops on the Utilization of Electron Beams, pp.41-59, JAERI-M-93-160, Bangkok and Jakarta, (1992)
- [33] “ タイヤの知識, ” http://truck.orix.co.jp/truck/source/i_ifren_n3.html

参考文献

- [34] R. Morrison, “ An Economic Analysis of Electron Accelerators and Cobalt-60 for Irradiating Food, ” TB1762, USDA, (1989)
- [35] S. Kinoshita, “ Current Status of Low Energy Electron Beam Accelerators and Their Applications, ” Proc. of Accelerator and Related Technology for Application 1999, pp. 85-88, Tokyo, (1999)
- [36] Hyeok-jung Kwon et al., “ Development of High Power Electron Accelerator, ” Proc. of the European Particle Accelerator Conference 2000, 2, pp. 2612-2614, Vienna, (2000)
- [37] A. S. Alimov et al., “ High-power CW LINAC for food irradiation, ” Appl. Rad. and Isotopes, Vol.53, pp.815-820, (2000)
- [38] J. Pottier, “ A new type of RF electron accelerator: the rhodotron ”, Nucl. Instrum. & Methods Phys. Res. B 40/41, pp.943, (1989)
- [39] David R. Kerluke et al., “ Facility to Disinfect Medical Wastes by 10 MeV Electron Beam, ”Proc. of the 23rd Japan Conference on Radiation and Radioisotopes, A303, Tokyo, JAIF, (1998)
- [40] C. C. Thompson, “ Multi-Loop Feedback System for Dynamitron voltage regulation, ” IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol.14, pp.169-174, (1967)
- [41] “ 電子線照射装置 ”, <http://www.nhv.jp/products/epsmain.html>
- [42] “ CPI Eimac Division, ” <http://www.cpii.com/eimac/index.html>
- [43] M.A.D. Wilson, “ CW Racetrack Microtrons, ” Proc. of the Particle Accelerator Conference 1991, San Francisco, Vol. 1, pp. 71-75, (1991)
- [44] V.I. Shvedunov et. al., “ Moscow State University CW Race-Track Microtron, ” Proc. of the Particle Accelerator Conference 1993, Washington, Vol. 2, pp. 2059-2061, (1993)

- [45] E. Stiliaris et al., " The IASA 10MeV CW-Linac, " Proc. of the European Particle Accelerator Conference 2000, pp.866-868, Vienna, (2000)
- [46] P. Lidbjork, " Microtrons ", CERN 94-01, Vol. 2, pp.971-981, (1994)
- [47] H. Tanaka, " Beam Dynamics in a CW Microtron for Industrial Applications ", EPAC 2000, Vienna, pp.1005-1007, (2000)
- [48] 蒲越虎, 田中博文, 中西哲也, 花川和之, 金太炫, 築島千尋, 牧田陽, " 熱陰極 500MHz-CW 電子銃の開発, " 第28回リニアック技術研究会, 東海村, (2003)
- [49] S. Tokumoto et al., " Improvements on Accelerating Cavities and High Power Test at the Photon Factory Storage Ring ", KEK-Internal 88-6, (1988)
- [50] H. Suzuki et al., " High Power Test of RF Cavity for SPring-8 Booster Synchrotron, " Proceedings of the 8th Symp. On Accelerator Science and Technology, Saitama, (1991)
- [51] FAO/WHO 合同食品規格委員会 : 照射食品に関する国際一般規格, ローマ, (1984)
- [52] James H. Billen, " POISSON SUPERFISH ", LA-UR-96-1834, Los Alamos National Laboratory, (1996)
- [53] MAFIA, release 4, CST GmbH, (1997)
- [54] M. Akemoto and Y. Yamazaki, " High Power Input Coupler for the TRISTAN APS Cavity, " Proc. of the 7th Symp. On Accelerator Science and Technology, pp.106-108, Osaka, (1989)
- [55] Y. Hirao, M. Kodera, H. Kamitsubo, and T. Fuketa, " Handbook of Accelerator Engineering, " Japan Atomic Industry Forum, pp.121, (2000)
- [56] A. Ratti, et al., " The SNS RFQ Prototype Module ", Proc. of Particle Accelerator Conference 99, pp.884-886, New York, (1999)

参考文献

- [57] S. Sakanaka, et al., “ High-Power Test of a 714MHz HOM-Damped Cavity for the ATF Damping Ring, ” Proc. of the European Particle Accelerator Conference 96, Sitges (Barcelona), (1996)
- [58] “ ANSYS, ” <http://www.cybernet.co.jp/products/ansys/>
- [59] 管路・ダクトの流体抵抗出版分科会編, “ 技術資料 管路・ダクトの流体抵抗 ”, 日本機会学会, (1979)
- [60] A. W. Chao and M. Tigner, “ Handbook of Accelerator Physics and Engineering, ” pp.315, World Scientific, 1998
- [61] “ 伝熱ハンドブック ”, 日本機会学会,(1993)
- [62] 熊谷教孝, “ 高エネルギー加速器入門, ”OHO84 加速器夏期講座講義録, pp.III-21, KEK 加速器科学専奨励会, (1984)
- [63] T.T. Yang, et al., “ ON THE MECHANICAL DESIGN OF A 1.5 GHz LANDAU CAVITY ”, Proc. of Particle Accelerator Conference 97, pp.3054-3056, (1997)
- [64] R. A. Millikan and R. A. Sawyer, Phys. Rev. 12, 167, (1918)
- [65] R.M. Hutcheon, et al.,“ OPERATION OF A CW HIGH POWER RFQ TEST CAVITY: THE CRNL “ SPARKER“ ”, Proc. of Linear Accelerator Conference, GSI, (1984).
- [66] T. Yoshiyuki, et al., “ High Power Test of RF Cavities for PLS Storage Ring, ” Proc. of Symp. on Acc. Sci. and Tech. '94, pp.175-177, Tokyo, (1994)
- [67] “ ダイヤモンドカッター・ボラゾンカッター, ” <http://www.seiken-co.jp/dia.htm>
- [68] T. Fukushima and T. Katayama: INS-TH-96, Institute for Nuclear Study, University of Tokyo, (1975)
- [69] T. Kusaka, et al., “ Design of RF Cavities for the Spring-8 Storage Ring, ” Proc. of 7th Symp. on Acc. Sci. and Tech., pp.106, Osaka, (1989)

- [70] “ Spring8 Sy, ” <http://acc-web.spring8.or.jp/~synchro/intro.html#rf>
- [71] E. Chishiro, et al., “ Evaluation of Operating Characteristics of IOT RF Source, ” Proc. of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp.197-199, Sapporo, (1999)
- [72] Lee.A, CPI, Private communication
- [73] “ Bファクトリーの加速器, ”OHO94 加速器夏期講座講義録, pp.VI-10, KEK 加速器科学専奨励会, (1994)
- [74] M. Akemoto and Y. Yamazaki, “ High Power Input Coupler for the Tristan APS Cavity, ” 7th Symp. on Acc. Sci. and Tech., pp.106-108, Osaka, (1989)
- [75] F. Naito, et al., “ Input Coupler for the KEKB Normal Conducting Cavity ”, Proc. of Particle Accelerator Conference 95, pp.1884-1886, Danvers, (1995)
- [76] H.Tanaka, Y.H. Pu, T.H. Kim, Y. Makita, C. Tsukishima, T. Nakanishi, S. Nakamura, “ CW microtron with a 500 MHz RF cavity for industrial applications, ” Int J. of App. Electromag. Mech., Vol. 14, pp. 177-184, (2001/2002)
- [77] H.D.Schwarz, et al., “ DEVELOPMENT OF A MOVABLE PLUNGER TUNER FOR THE HIGH-POWER RF CAVITY FOR THE PEP-II B FACTORY ”, Proceedings of Particle Accelerator Conference 97, Vancouver, (1997)
- [78] H.D. Schwarz et al., “ Development of a movable plunger tuner for the high-power RF cavity for the PEP-II B Factory ”, Proceedings of Particle Accelerator Conference 97, Vancouver, (1997)
- [79] “Stepping Motor オリエンタルモーター社” <http://www.orientalmotor.co.jp/cgi-bin/WebObjects/OM.Step.woa/wa/default>
- [80] Micro Wave & Millimeter Wave Equipments Catalogue, 日本高周波 (株), Vol.1, pp.104

参考文献

- [81] CERN Accelerator School RF Engineering for Particle Accelerator, CERN92-03 Vol.I , pp.109, GENEVA, (1992)
- [82] 山崎良成, “ 高周波加速装置, ”OHO84 加速器夏期講座講義録, pp.IV-1-IV-30, KEK 加速器科学専奨励会, (1984)
- [83] 谷口周一, “ インハウス型小型照射装置の紹介 (その 1), ”防菌防黴学会誌, Vol.30, No.7, pp.32 ,(2002)
- [84] “ Electron Accelerators No.1 & No.2 in JAERI Takasaki, ”
<http://kikaku.tokai.jaeri.go.jp/ken-kyou/sisetu-syokai/ElectronAcc.html>
- [85] 田中 博文 他、”500MHzCW 電子銃の物理設計 ”、物理学会講演概要集第 1 分冊, 2001 年年次大会, (2001)
- [86] P.F. ドラッカー, “ イノベーションと起業家精神 (上) , ”pp.116-135, ダイヤモンド社, (1997)
- [87] ジョージ・デイ, “ ウォートンスクールの次世代テクノロジー・マネジメント, ”pp.21-48, 東洋経済新聞社, (2002)
- [88] Clayton M. Christensen, “ The Innovator’s Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail, ” Harvard Business School Press, June 1, (1997)
- [89] クレイトン・クリステンセン (著), 玉田 俊平太, 伊豆原 弓, “ イノベーションのジレンマ 技術革新が巨大企業を滅ぼすとき, ” 翔泳社、(1999)
- [90] Clayton M. Christensen, Michael E. Raynor, “ The Innovator’s Solution: Creating and Sustaining Successful Growth, ” Harvard Business School Press, September, (2003)
- [91] クレイトン・クリステンセン (著), マイケル・レイナー (著), 玉田 俊平太, 櫻井 祐子 (翻訳), “ イノベーションへの解 利益ある成長に向けて, ” 翔泳社、(2003)
- [92] “ 照射食品の安全性と栄養適性, ” コープ出版 (1996)

- [93] “ イギリスにおける食鶏肉照射の経済性放射線利用技術試験研究データベース, ”
<http://www.rada.or.jp:8180/member/detail/020044.html>, (1997)
- [94] P.N.Sockett, “ The Epidemiology and Costs of Diseases of Public Health Significance, in Relation to Meat and Meat Products, ” *Journal of Food Safety*, Vol.15, pp.91 (1995)
- [95] “ Catch the Wave, ” WHO, <http://www.iaea.org/icgfi/documents/catch-the-wave.htm>, (1994)
- [96] 伊藤均, “ 食品照射の基礎と安全性; 食品衛生・貯蔵にはたす放射線処理の可能性, ” *JAERI-Review2001-029*, (2001)
- [97] “ オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書, ”
<http://www.houko.com/00/05/S63/009.HTM>, (2002)
- [98] 食品照射解説資料、pp.1-146, 日本原子力産業会議, (1992)
- [99] “ International Consultative Group on Food Irradiation, IAEA, ”
<http://www.iaea.org/icgfi>
- [100] *Federal Registor*, FR61 95, (1996)
- [101] 謝 牧謙, “ 中国における放射線、アイソトープ利用の現状と将来の展望, ” *放射線と産業*, No.100, pp.28-38, (2003)
- [102] “ 第 229 号 中国における農業及び農産物輸出の実態と今後の展開方向, ” *CLAIR REPORT*, (2002), http://www.clair.or.jp/j/forum/c_report/cr229m.html
- [103] “ 中国経済・産業の回顧と展望 《2003 / 2004》, ”
http://www.cjcci.biz/sansi_pdf_2004/index.htm
- [104] “ Commercial Activities on Food Irradiation, ” IAEA ICGFI division, (2003),
<http://www.iaea.org/icgfi/documents/commeact.htm>
- [105] “ 中国統計年鑑 2001, ” 中国統計出版社, pp.L1217, (2001)

参考文献

- [106] 石井伸一, "ロジスティクスマネジメントサービス," IT ソリューションフロンティア, pp.12, 野村総研, (2001)
- [107] マイケルポーター, "競争優位の戦略," ダイヤモンド社, (1986)
- [108] マイケル・ポーター, "競争の戦略," ダイヤモンド社, (1982)
- [109] David R. Kerluke et al., "Facility to Disinfect Medical Wastes by 10 MeV Electron Beam," Proc. of the 23rd Japan Conference on Radiation and Radioisotopes, A303, Tokyo, JAIF, (1998)
- [110] "清華同方," <http://www.thtf.com.cn/www/web/index.aspx>
- [111] 橋田 坦, "北京のシリコンバレー 中国ハイテクのキャッチアップは可能か," 白桃書房, (2000)
- [112] 加納剛太, "日米補完協業が経済を再生する," pp102-106, 東洋経済, 東洋経済新報社, (1998)
- [113] 松山丈夫, private communication
- [114] 中村彰太郎, "渡り鳥だよ人生は 国際化に云うこと," 茨城大学工学部寄稿論文, (2000)
- [115] 少徳敬雄, "松下電器産業(株)における中国事業展開と事業提携について," pp.64-70, 国際協業講義テキスト, 高知工科大学, (2003)
- [116] 亀山 研二, "「ばれいしょ」の実用化照射プラントの現状と問題点," 土幌町農協, pp.48-52, (1975), <http://takafoir.taka.jaeri.go.jp/dbdocs/003001000004.html>
- [117] "JETRO-中国情報頁-," 日本貿易振興機構, <http://www3.jetro.go.jp/tppoas/collection/china/>
- [118] 堀義人他, "ファイナンス," MBA ビジネスプラン, pp190-243, ダイヤモンド社, 東京, (1998)

参考文献

- [119] 田中博文, 牧田陽 他, “ 大出力 CW マイクロトロンと FFAG 入射方式ラップトップ円形誘導加速器の開発, ” 原子核研究, Vol. 48, No. 5, pp11, (2003)

参考文献

研究業績

A. 論文誌

- [1] Y. Makita, T. Nakamura, H. Tsuchidate, and M. Yamazaki, “ Radiation Shielding Design of a Cancer Therapy Facility using Compact Proton Synchrotron ” J. of Nuc. Sci. and Tech., Sup.4, pp. 8-21, (2004)
- [2] Y. Makita, T. Takeuchi, T. Mitsuhashi, K. Fukuya, H. Okashita, S. Maeda, and H. Yoshiyasu, “ An Optimum Design of Short-Circuit Electromagnetic Forces of Multi-Finger Systems in Power Devices, ” IEEJ Trans. PE (投稿中)
- [3] Y. Makita, T. Nakanishi, Y.H. Pu, H. Tanaka, A. Maruyama, T. H. Kim, C. Tsukishima, S. Yamamoto and S. Nakamura, “ Design, Fabrication and Power Tests of a 500 MHz RF Cavity of a CW Microtron for Industrial Applications, ” J. J. Appl. Phys. (投稿中)
- [4] H.Tanaka, Y.H. Pu, T.H. Kim, Y. Makita, C. Tsukishima, T. Nakanishi, S. Nakamura, “ CW microtron with a 500 MHz RF cavity for industrial applications, ” Int J. of App. Electromag. Mech., Vol. 14, pp. 177-184, (2001/2002)
- [5] U. Fischer, Y. Oyama, F. Maekawa, C. Konno, M. Wada, C. Ichihara, Y. Makita, A. Takahashi, K.Ueki, K.Kosako, M.Youssef, H.Hunter, C.Slater, F.Kappler, E.Stein, H.Tiege Tamirat, E.Wiegner, T.Bachistoni, L.Petrizzi, V.Rado, L.Benmansour, A.Santamarina, K.Seidel, A.Blokin, S.Simakov, V.Scinitza, and D.Markovskij , “ Benchmark Validation of the FENDL-1 Nuclear Data Library -A Coordinated International Effort-“ , Fusion Technology, Vol.30, pp.1093-1100, (1996)
- [6] U. Fischer, Y. Oyama, F. Maekawa, C. Konno, M. Wada, C. Ichihara, Y. Makita, and A. Takahashi, “ Integral Benchmark Tests of the FENDL1 Nuclear Data Library, ” Fusion Eng. and Design, Vol.37, pp.9-21, (1997)

B. 報告・解説

- [1] Y. Makita, and A. Takahashi, “ IAEA Benchmark Problem Based on the Time-of-Flight Experiment on Iron Sphere at OKTAVIAN/Osaka University, ” FENDL-2 BENCHMARKS SUBLIBRARY, IAEA Nuclear Data Section, <http://www-nds.iaea.or.at/fendl2/VALIDATION/BENCHMARKS/OKTAVIANFENI/FE.DOC>, (1995)
- [2] Y. Makita, and A. Takahashi: “ IAEA Benchmark Problem Based on the Time-of-Flight Experiment on Nickel Sphere at OKTAVIAN/Osaka University, ” FENDL-2 BENCHMARKS SUBLIBRARY, IAEA Nuclear Data Section, <http://www-nds.iaea.or.at/fendl2/VALIDATION/BENCHMARKS/OKTAVIANFENI/NI.DOC>, (1995)
- [3] A. Pashchenko, Y. Makita, et al., “ Completion of FENDL-1 and Start of FENDL-2; Summary Report, ” IAEA Nuclear Data Section, Vienna, Austria , INDC(NDS)-352, (1996)
- [4] F. Maekawa, M. Wada, C. Ichihara, Y. Makita, A. Takahashi and Y. Oyama, “ Compilation of Benchmark Results for Fusion Related Nuclear Data ”, JAERI-Data/Code 98-024, (1998)
- [5] T. Nakamura, T. Kurosawa, M. Sasaki, H. Iwase, T. Nunomiya, and Y. Makita, “ Shielding Design of a new AVF Cyclotron (K=130), ” Tohoku University CYRIC Report, (1999)
- [6] F. Maekawa, M. Wada, C. Ichihara, Y. Makita, A. Takahashi and Y. Oyama, C-98-29(E), OKTAVIAN Report, Osaka University, (1998)
- [7] U. Fischer, Y. Oyama, F. Maekawa, C. Konno, M. Wada, C. Ichihara, Y. Makita, and A. Takahashi, C-97-10(E), OKTAVIAN Report, Osaka University, (1997)
- [8] U. Fischer, Y. Oyama, F. Maekawa, C. Konno, M. Wada, C. Ichihara, Y. Makita, A. Takahashi, K.Ueki, K.Kosako, M.Youssef, H.Hunter, C.Slater, F.Kappler, E.Stein, H.Tiege Tamirat, E.Wiegner, T.Bachistoni, L.Petrizzi, V.Rado, L.Benmansour, A.Santamarina, K.Seidel, A.Blokin, S.Simakov, V.Scinitza, and D.Markovskij , C-97-10(E), OKTAVIAN Report, Osaka University, (1997)

- [9] 田中博文、中西哲也、蒲越虎、丸山昭彦、牧田 陽、金太炫、築島千尋、山本俊二、“大出力CWマイクロトロンとFFAG入射方式ラップトップ円形誘導加速器の開発”，原子核研究, Vol. 48, No. 5, pp.11-23, (2003)

C. 国際会議論文

- [1] Y. Makita, C. Tsukishima, H. Nagayama, K. Yoshida, H. Harada, and H. Tsuchidate, “A non-resonant RF cavity loaded with amorphous alloy for proton cancer therapy,” Proc. of the Particle Accelerator Conference 1999, Vol. 2, pp.848-850, New York, (1999)
- [2] Y. Makita, T. Nakamura, H. Tsuchidate, and M. Yamazaki, “Radiation Shielding Design of a Cancer Therapy Facility using Compact Proton Synchrotron,” Proc. of the 2nd iTRS International Symposium On Radiation Safety and Detection Technology, pp.35, (2003)
- [3] Y. Makita, T. Takeuchi, T. Mitsuhashi, K. Fukuya, H. Okashita, S. Maeda, and H. Yoshiyasu, “An Optimum Design of Short-Circuit Electromagnetic Forces of Multi-Finger Systems in Power Devices,” Proc. of International Conference on Electrical Engineering, Sapporo, Japan, 4-8 July, (2004)
- [4] Y. Makita, I. Murata, C. Ichihara, and A. Takahashi, “Benchmark of FENDL/E-1.0, JENDL-3.2 and JENDL-Fusion File using Neutron Leakage Spectra of Spherical Beryllium Assemblies, Proc. of Advisory Group Meeting on Completion of FENDL-1 and Start of FENDL-2 hosted jointly by TSI Research and ITER Joint Central Team at San Diego, Del Mar, California, (1995)
- [5] H. Tanaka, Y. H. Pu, T. H. Kim, Y. Makita, C. Tsukishima, and T. Nakanishi, “Beam Test of a CW Microtron with a 500 MHz RF cavity for Industrial Applications”, Proc. of the Particle Accelerator Conference 2003, Seattle, Vol., pp., (2003)
- [6] T.H. Kim, H.tanaka, Y.Pu, Y. Makita, T.Nakanishi, S.Nakamura, “Design and a Beam Test of an LEBT of a CW Microtron, Proc. of EPAC2002, (2002)
- [7] H. Tanaka, Y. H. Pu, T. H. Kim, Y. Makita, C. Tsukishima, and T. Nakanishi, “CW Microtron with a 500 MHz RF Cavity for Industrial Applications,” Proc. of

研究業績

the 10th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, pp. 331-332, Tokyo, (2001)

D. 国内学会発表

- [1] 牧田 陽, 中西哲也, 蒲 越虎, 田中博文, 金 太炫, 丸山昭彦, 築島千尋, 山本俊二, 中村史朗, “ High Power Test of a 500 MHz RF Cavity of a CW Microtron for Industrial Applications, ” 第 14 回加速器科学研究発表会, pp.344-346, (2003)
- [2] 牧田 陽, 蒲 越虎, 中西 哲也, “ Thermal and Structural Design of an RF Cavity for a CW Microtron, ” 第 13 回加速器科学研究発表会, pp.244-246, (2001)
- [3] 牧田 陽, 中村尚司, 土館, 山崎正晴, “ Shielding Design of the Cancer Therapy Facility using Compact Proton Synchrotron, ” 第 12 回加速器科学研究発表会, pp. 346-348, (1999)
- [4] 田中博文, 中西哲也, 蒲越虎, 丸山昭彦, 牧田 陽, 金太炫, 築島千尋, 山本俊二, “ ラップトップ型電子円形誘導加速器の研究, ” 日本原子力研究所第 7 回黎明研究報告会報告集 (in press), (2004)
- [5] 田中博文, 中西哲也, 蒲 越虎, 丸山昭彦, 牧田 陽, 金太炫, 築島千尋, 山本俊二, “ 5MeV・CW マイクロトロンへのビーム試験, ” 第 6 回応用加速器・関連技術研究シンポジウム, (2004)
- [6] 中西哲也, 田中博文, 蒲 越虎, 金 太炫, 牧田 陽, 丸山昭彦, 築島千尋, 山本俊二, 中村史朗, “ Development of a MELCO High Intensity Microtron for Industrial Applications, ” 第 14 回加速器科学研究発表会, pp.287-289, (2003)
- [7] 田中博文, 丸山昭彦, 蒲 越虎, 牧田 陽, 築島千尋, 中西哲也, 山本俊二, “ 医療・工業用ラップトップ円形誘導加速器の検討, ” 日本物理学会第 58 回年次大会, (2003)
- [8] 蒲 越虎, 田中博文, 中西哲也, 花川和之, 金 太炫, 築島千尋, 牧田 陽, “ 熱陰極 500MHz-CW 電子銃の開発, ” 第 28 回リニアック技術研究会, <http://lam28.tokai.jaeri.go.jp/proceedings/FB-2.pdf>, (2003)
- [9] 田中博文, 中西哲也, 蒲 越虎, 丸山昭彦, 牧田 陽, 金 太炫, 築島千尋, 山本俊二, “ 大出力 CW マイクロトロンと FFAG 入射方式ラップトップ円形誘導加速器の開発, ” 小型加速器の利用推進に関する研究会, 高エネルギー物理学研究機構, (2003)

- [10] 中西 哲也, 田中博文, 蒲 越虎, 牧田 陽, 金 太炫, 丸山昭彦, 築島千尋, 山本俊二, 中村史朗, “ Development of a melco high intensity microtron for Industrial Applications, ” 第 5 回応用加速器・関連技術研究シンポジウム, (2003)
- [11] 田中博文, 中西哲也, 蒲 越虎, 丸山昭彦, 牧田 陽, 金太炫, 築島千尋, 山本俊二, ” 500MHz-CW 電子銃のビーム解析とビーム実験結果の比較, ” 日本物理学会 2002 年秋季大会, (2002)
- [12] 田中 博文, 蒲越 虎, 金 太炫, 牧田 陽, 中西 哲也, 中村 史朗, “ 500MHzRF 空洞を用いた CW マイクロトロン¹⁾のビーム設計, ” 第 13 回加速器科学研究発表会, pp. 86-88, (2001)
- [13] 田中 博文, 蒲越 虎, 金 太炫, 牧田 陽, 築島千尋, 中西 哲也, “ 産業用 5MeV CW マイクロトロン¹⁾のビーム力学設計, ” 第 3 回応用加速器・関連技術研究シンポジウム, pp.51-52, (2000)

E. 特許

- [1] 牧田 陽, 他 特許公開平 10 - 268010 磁界測定装置
- [2] 牧田 陽 特許公開平 11 - 329796 等時性サイクロトロン
- [3] 牧田 陽 特許公開 2000 - 299200 周波数変調器及びそれを備えたサイクロトロン
- [4] 牧田 陽, 他 特許公開 2001 - 221860 放射線施設の線量当量評価方法、線量当量を評価するコンピュータプログラムを記録した記録媒体および線量当量評価装置
- [5] 牧田 陽 特願 2002-006306 高周波加速空洞
- [6] 牧田 陽 特許公開 2003 - 209000 高周波加速空洞の冷却機構
- [7] 牧田 陽, 他 2003-1215 出願 電力用開閉装置の電磁操作機構
- [8] 牧田 陽, 他 2003-1101 出願 遮断器