

氏 名 堀 利 匡

学位（専攻分野） 博士(工学)

学 位 記 番 号 総研大乙第111号

学位授与の日付 平成15年3月24日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学 位 論 文 題 目 小型放射光源用入射器マイクロトロンの研究開発

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 高田 耕治  
教授 伊澤 正陽  
教授 佐藤 康太郎  
教授 神谷 幸秀  
主任研究 山崎 良成（日本原子力研究所）  
員

## 論文内容の要旨

### 小型放射光源用入射器マイクロトロンの研究開発

#### R&D of Injector Microtron for Compact SR Ring

#### 背景：

1980年代に半導体記憶素子 DRAM の大容量化が進み、LSI 回路の微細化で線幅がサブミクロンの時代に突入した頃、従来の光リソグラフィーでは波長に起因する分解能の限界に近づいており、次世代の半導体量産技術として X 線リソグラフィーが有望視されていた。その新手法に適した新しい光源(大強度軟 X 線源)として、産業利用を主眼にした小型放射光源(SR リング)の研究開発が 80 年代中頃から民間企業の間で盛んになった。学術研究用の SR リングと異なりエミタンス等ビームの基本特性に重きを置かず、X 線リソグラフィーに適した波長 $\sim 1\text{nm}$ のフラックスが適度の指向性と共に高強度で得られ、かつ操作と保守が容易な安定した光源として小型化を目指す動きであった。従来の光に代えて半導体製造工業に導入できる短波長光源を念頭においた実用的 X 線源の開発である。著者が所属していた住友重機械工業(株)で開発された超小型 SR リングシステムは AURORA と命名され、その理念は以下のようなものである。

- ・ 小さなシステムで、シンプルな構成であること。
- ・ 操作が容易で安定に動作し、かつ信頼性の高いものであること。
- ・ 制作費や運転経費など、コストパフォーマンスに優れた装置であること。

本論文では民間企業が独自に進めた小型 SR リング開発の過程において、特に入射器の研究開発の経緯に焦点を絞って記述した。入射器の機種選定から初号機の製作、その改良から性能の達成、更には 2 号機から 4 号機の製作を通して安定した性能を発揮できる産業用装置として完成に至るまでの経緯について詳述する。

#### 入射器の概要：

SR リングにとって標準的入射器はライナックであるが、AURORA では加速エネルギー 150MeV のレーストラック型マイクロトロンを採用した。入射系にバンチャーを準備しなくても引出電流 5mA が得られ、ビームパルス幅  $0.1\sim 3\mu\text{sec}$ 、パルス繰り返し  $1\sim 100\text{Hz}$  の基本仕様で、AURORA の入射器として妥当であるとの判断に基づく。汎用的な入射器のライナックに比べてコンパクトであるという大きな利点を有する。最大ビーム電流はライナックほど多くを期待できないが、 $\Delta E/E$  が  $\pm 0.1\%$  と高品質である。

基本概念は Wisconsin 大の SR リング Aladdin の入射器 100MeV マイクロトロン(後に 108MeV に増強)の設計に準拠した。主たる相違点は、電子銃を始めとする前段入射系、周回部の集束系、加速管のタイプ、ビームモニター系、ビーム引出部等である。全く概念の異なる Mainz 大の原子核実験用 CW マイクロトロン(3 段カスケードで到達エネルギーが 855MeV)を別にして、単段のマイクロトロンで世界最高の加速エネルギー 150MeV を達成した。或いは、パルスマシンとして最大エネルギーを有するマイクロトロンを完成し

たともいえる。

住友重機械工業（株）で独自に開発したマイクロトロンでは、初期設計によるプロト機で数十 $\mu$ Aの電流値しか得られなかったものの、改良後直ちに数mAの引出電流値を得た。その後、現在に至るまで入射器として安定に稼働し、機種選択の正当性を実証できた。改良設計に際して実施された入念なシミュレーションの内容について述べ、また電磁石など個別要素の概要についても併記する。既存のBT系を流用したため精度の面で改良の余地を残したが、引出ビームのエミタンスを測定する機会を得たので計算結果との比較も可能となった。これまで合計4台のマイクロトロンが製作され、すべて順調に稼働中である。最大引出電流を10mAに増強したHiSOR向けの入射器や、前段の入射系にフォトカソードRFガンを装備したマイクロ単バンチ加速用のユニークな研究用マシンも実現している。まだ軌道計算だけで実現には至っていないが、引出エネルギー倍増の300MeVマイクロトロンも従来の設計を延長すれば可能という結論を得ている。

まとめ：

- ・ 小型SRリングの入射器に適した世界最高エネルギーの150MeVレーストラック型単マイクロトロンを完成した。
- ・ 独自の計算コードによる綿密なシミュレーションを行い、パルスマイクロトロンの設計手法を確立した。また、引出ビームのエミタンス測定を行い、本設計の妥当性を実証できた。
- ・ 複数台の製作実績を積み重ねることにより、150MeVマイクロトロンをカタログ製品のな実用産業装置として確立できた。

## 論文の審査結果の要旨

堀 利匡氏の論文の内容は、数百MeVの産業用軟X線用小型放射光リングを工業製品化するにあたり、それに適した入射器として、リニアックとの比較のうえでマイクロトロンを選択した理由と、その性能限界を論じたものである。マイクロトロンの基礎理論と精密なシミュレーション研究にもとづいて、ビーム軌道の周回数の上限がほぼ25にあり、それはビームエネルギーの上昇に伴うシンクロトロン振動の安定位相領域の減少にあることを明らかにした。その結果、150 MeVまで加速可能なレーストラック型マイクロトロンを完成に導いた。同氏のこの成果は、Wisconsin大学やLund大学が持つ最大級マイクロトロンのエネルギー上限100 MeVを50 MeVも越えるもので、マイクロトロンの分野において画期的なものである。また加速周波数を下げれば、300 MeVも可能であるという重要な知見も得ている。

論文の主要部は、マイクロトロンの原理と概要、軌道計算とそれにもとづく基本設計、加速試験による性能の検証の3章であり、それに序章とまとめの章をあわせて全体を構成する。序章においては、マイクロトロンがリニアックにくらべ入射器として優れている点を明確に指摘し、研究の出発点をしっかりと位置づけている。マイクロトロンの原理と概要の章では、周回軌道間の分離の大きさ、とくに1回目の軌道の問題点が論じられ、ビームダクトの現実的な設計指針を論じている。軌道計算の章では水平、垂直方向のベータトロン振動、シンクロトロン振動、ビーム追跡計算の詳細な解析結果が述べられている。ベータトロン振動については、マイクロトロン特有の磁場分布による効果を調べ、収束性には問題がないことを明らかにした。むしろ、ビーム残存量はシンクロトロン振動、特に安定位相領域の漸減が大きく影響していることを見出した。具体的には25周回目に約25%のビーム損失が起これ、これがエネルギー上限を決める主因であると結論づけている。加速試験の章では、シミュレーションをほぼ裏付ける観測結果をまとめている。高速電流トランスやシンクロトロン放射光モニターなどによるビーム信号によれば、ビームはほぼシミュレーション通りに振舞っていることが確認される。これは加速器が設計通りに正確に建設された証拠でもある。まとめの章においては、マイクロトロンの将来性について整理されているが、とくに加速周波数を下げれば、300 MeVも可能であるという示唆は加速器科学にとって重要な知見である。

このように、同氏の成果はマイクロトロンの分野において画期的なものであり、十分に学位授与に値するものであるとして、審査委員会は全員一致で合格と判定した。