

話 題

企業に於ける加速器システムの開発研究

田中 博文*

Research Activities of Accelerators at a Corporation

Hirofumi TANAKA*

1. はじめに

加速器技術は、社会に直接、間接にインパクトを与え人々の暮らしを豊かにしてきた。科学技術の振興による産業力強化が叫ばれている現在、より直接的に社会に貢献できる産業・医療用加速器を開発しようとする研究者が増えてきた様に感じられる。本報告では筆者が企業の加速器研究者として関係してきた産業・医療用加速器開発の内、3つの加速器に関して紹介させていただく。最初に、半導体製造（X線リソグラフィ）に用いるべく開発を行った小型放射光装置に関して記述する。次に電子線やX線による滅菌・殺菌に用いる大出力CW加速器に関して記述する。3番目に、現在開発中で高輝度のX線が発生可能であるラップトップ加速器に関して紹介する。この報告を読み、産業・医療用加速器に少しでも興味をもって頂ければ幸いである。

筆者は電力機器やFA機器を開発する研究部門に属している。加速器開発では、研究用加速器や粒子線がん治療システムの開発を工場の技術者と一緒に行うと共に、次世代の産業・医療用加速器の開発を行っている。加速器以外では、CRT (Cathode Ray Tube) やビーム加工機といった荷電粒子ビームを用いる機器、半導体製造プロセス等における放射線や荷電粒子が関係する技術開発に携わっている。異分野の最新の研究成果に常に触れ新しい技術を導入できるのが企業の研究者の強みである反面、一つの技術を深掘する事に限界があるのが弱みであろう。

2. X線リソグラフィ用小型放射光装置

1980年代後半よりいくつかの国内加速器メーカーが

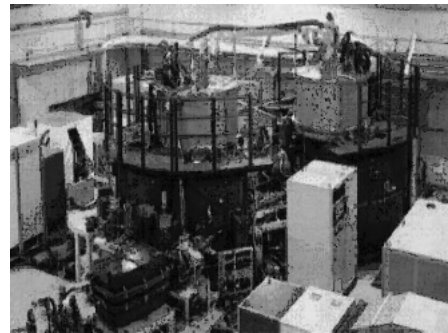


図1 三菱電機超電導蓄積リング

表1 超電導蓄積リングの基本パラメータ

加速エネルギー	600 MeV
入射エネルギー	600 MeV
蓄積電流	430 mA
周長	9.2 m
偏向半径	0.593 m
偏向磁場強度	3.5 T
臨界波長	1.65 nm

半導体製造向け小型放射光装置の全体システム開発を行った。半導体の微細化のキー技術であるリソグラフィの光源として放射光を用いる機運が高まった為である。半導体製造メーカーでもある当社は先端技術総合研究所内にリソグラフィの研究を行う小型放射光装置を開発した¹⁾。図1に超電導蓄積リングの全体写真を、表1に基本パラメータを示す。放射光装置は1993年から放射光供給を開始し、2000時間/年程度の運転を行い、2005年3月まで運転した。研究では、

* 三菱電機株式会社・先端技術総合研究所
Mitsubishi Electric Corporation Advanced Technology R & D Center, Head Research Scientist
(E-mail: tanaka.hirofumi@wrc.melco.co.jp)

35 nm のハーフピッチが転写できる見通しを得ている²⁾。半導体工場への小型放射光装置の導入は実現していないが、開発技術や運転・維持管理ノウハウはその後の粒子線がん治療装置開発や研究用加速器開発に貢献している。小型放射光装置に関する詳細は別の機会に紹介させて頂くこととし、本報告では超電導蓄積リングのビーム力学設計時の苦労話を記述し、企業研究者の仕事の進め方に関して紹介させて頂く。

超電導蓄積リングのビーム力学設計時に最も苦労した点は、超電導偏向電磁石の不均一磁場を考慮できるシミュレーション手法を開発することであった。超電導偏向電磁石は偏向角 180 度のバナナ型超電導コイルで磁場を形成しており、常電導偏向電磁石と比較すると均一磁場領域が少なく、大型加速器の様に偏向電磁石内を均一磁場と近似すると、大きな計算誤差を生じる。また、従来手法は偏向半径と比較して電子ビームの振動振幅が小さいとした近似を行い、方程式を線形化していたが、偏向半径が 0.593 m と小さい超電導蓄積リングでは上記近似をすると誤差が大きかった。この様な課題を解決する為には、不均一な磁場が考慮でき、且つ、非線形の運動方程式で軌道解析を行えるコードが必要であった。

ところで、非線形の運動方程式を解くには数値積分手法を用いるが、ルンゲクッタ法等の汎用数値積分手法では、定式化の際に展開次数の高次の項を省略しているため、その時間発展（物理量の変化）はシンプレクティックな変換（正準変換）になっていない。ハミルトニアン系における時間発展はシンプレクティック変換となっていなければならないので、汎用の数値積分手法で解いた長時間のシミュレーション結果は実際の物理現象と異なってしまう。例えば、長時間のビームトラッキングを行い、位相平面上に周回毎のビーム座標をプロットした時、位相平面上で楕円となる安定力学系であっても、シンプレクティック変換でない積分手法を用いると楕円が渦巻き状に広がったり、縮小したりする場合がある。図 2 は、座標 q 、運動量 p のハミルトニアン $H=1/2(p^2+q^2)$ で表せる調和振動子の安定力学系の長時間シミュレーション結果である。図中の円が厳密解、+プロットがオイラー法による数値解である。オイラー法で長時間シミュレーションを行うと、安定力学系であるのに位相平面上で発散してしまうことがわかる。

1983 年に R. D. Ruth がシンプレクティック数値積分手法に関する論文³⁾を発表し、その後、加速器や天文学の分野でシンプレクティック数値積分手法が研究されていた。しかし我々の課題を解決できる様な手法

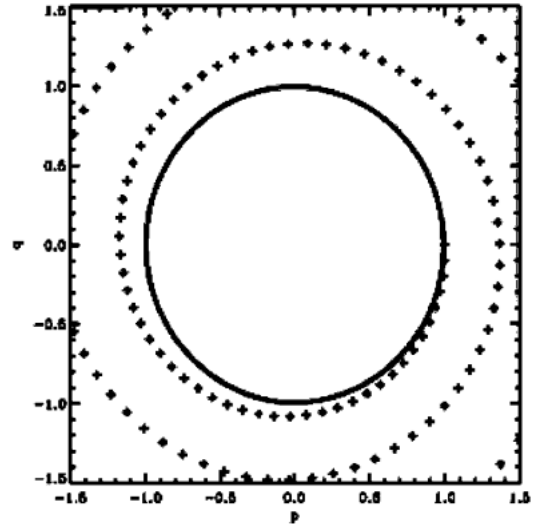


図 2 シンプレクティックでない数値積分手法の位相平面図

は当時見つからなかった。我々は A. J. Dragt らが開発した Lie 変換⁴⁾を応用し定式化を試みたが、ビーム進行方向の磁場成分をうまく取り込めず成功しなかった。また J. M. Sanz-Serna が提案したシンプレクティック・ルンゲクッタ法⁵⁾を適用しようと試みたが、計算スピードの問題で設計には使えなかった。

我々はシンプレクティック変換を諦め、現実的な方法で軌道解析を行うように方針を変更した。即ち、汎用のシンプレクティックでない数値積分手法でビームトラッキングを行うが、集積誤差が所定の許容値内となる様に 1 ステップ（運動）毎に局所打ち切り誤差の評価を行うという手法⁶⁾である。陽的ルンゲクッタ法、線形多段階法、陰的ルンゲクッタ法等の手に入るあらゆる汎用数値積分手法に関して計算誤差と計算スピードを比較し、最適な数値解析手法である 6 次のルンゲクッタバーナー法を選択した。次に、開発したコードを用い磁石配置等の設計を進める際に、新たな問題が発生した。当社の超電導蓄積リングはレーストラック形状で 180 度偏向電磁石 (BM) の間の直線部に収束電磁石 (QF) を 1 個のみ配置した構成である。直線部の QF 位置を決める為に、BM に対する QF 位置を変えながらビームトラッキングを行うと、QF を直線部の中心に置くと集積計算誤差が小さく、中心からずらすと誤差が大きくなるという結果になった。コードを改造し計算誤差を小さくする試みを 1 週間行ったが、改善は見られなかった。結局、上記現象が実際の物理現象であるのか、シンプレクティックでない解法の計算誤差であるのか原因を特定することはできなかった。しかし、ダンピング時間までの長時間シ

表2 ベータトロン振動数とクロマチシティの計算と実測結果の比較

		従来手法	開発手法	実測
ベータトロン振動数	水平	1.431	1.357	1.353
	垂直	0.591	0.440	0.441
クロマチシティ	水平	-1.10	-0.96	-0.92
	垂直	-0.65	-0.97	-1.07

ミュレーションを行っても位相平面上における楕円の発散量は数 mm 程度であり、電子ビームは必ず安定周回すると確信し、QF は直線部中心からずらした磁石配置で設計を進めることにした。

開発したコードで計算したベータトロン振動数、クロマチシティは、表2の様に実測値と良く一致⁷⁾しており、精度良く計算が行われていることが確認できた。当社の超電導蓄積リングのビーム収束系は、容易に変更できるパラメータが直線部のQF1個だけであり、計算が実際とずれていた場合の収束力の補正には限界があるが、計算で決めたパラメータで放射光供給を実現できた。電子ビーム形状の設計との相違が大きく拡大されるX線光学系の下流にある露光装置(X線ステップ)上で所定の形状のX線が届いていることを確認した時の感動は今でも鮮明に覚えている。

3. 滅菌・殺菌用大出力CW加速器

電子線・X線を用いた滅菌・殺菌照射処理は環境にやさしい処理方法であり、今後普及が進むと考えられる。滅菌・殺菌照射処理を普及させるには、低コスト、コンパクト、高電力効率である大出力電子加速器が必要となる。100 kW 級の大出力加速器は、静電加速器では5 MeV-200 kW のダイナミトロン、高周波加速器では10 MeV-200 kW のロードトロンがある。我々は、エネルギー5 MeV~20 MeV、ビーム出力50 kW~100 kW 程度の小型で自己遮蔽が比較的容易なCWマイクロトロンを開発した。大出力化のためにはCW (Continuous Wave) 運転が有効であるが、従来のSバンド加速管を用いたレーストラック型マイクロトロンでは、加速管の熱的問題からCW運転は難しい。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トロン加速条件を満たさなくなるという問題を生じる。我々は、この問題を解決するために、偏向磁場を2分割して加速位相調整する新しい方法を提案した⁸⁾。加速管としては、CW 運転への適性、200 kW 程度の大出力機への拡張性、加速器全体の大きさ、他研究機

表3 CW マイクロトロン主要パラメータ

	5 MeV 機	10 MeV 機	16 MeV 機
ビーム出力 (kW)	50	100	90
入射エネルギー (keV)	80	90	90
本体寸法 (m×m)	1.6×3.9	1.6×4.7	2.5×4.7

関での長期運転実績を考慮して500 MHzの常電導空洞を採用した。一方、電子銃は、長寿命化と加速不能な位相のビームによる熱発生抑制の為に、500 MHzにパルス化したビームを取り出せるCW電子銃を開発した⁹⁾。

本方式で実現可能な装置の主なパラメータを表3に示す。また、図3に5 MeVプロト機の平面図、図4に加速器本体とRF電源の写真を示す。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1次電子ビームのエネルギー上限は5 MeV、電子線照射は10 MeVである¹⁰⁾。5 MeVから10 MeVのエネルギーアップは、加速空洞を2台にする方法(表のパラメータ)と加速空洞が1台でターン数を増やす2つの方式が実現可能である。電力効率を重視する場合には加速空洞1台のタイプが望ましく、100 kWで37%程度の電力効率が期待できる。5 MeVプロト機は、試験を行っている建屋の放射線遮蔽の制約から制限されるビーム出力5 kWの加速試験を終え、機能検証試験を完了した。

滅菌・殺菌処理以外の大出力CW加速器の利用分野として、低速陽電子発生装置が魅力的である。低速陽電子は、欠陥や微小空孔の分析手段として、次世代LSI用の新しい膜材料開発(例えば低誘電率絶縁膜開発)のブレークスルーをもたらす可能性がある評価技術である。電子ビームを用いた陽電子発生には、線形加速器が用いられることが多い。低速陽電子の発生効率が高い100 MeV程度の電子ビーム加速が比較的容易に実現できるからである。しかし、CW加速器の様に100 kW近い電子ビームが得られれば、16 MeVという低エネルギーでも、世界トップクラスの低速陽電子を発生させることが可能である。我々が行った18 MeVライナックを使った低速陽電子発生実験の結果¹¹⁾や、世界の研究機関の電子エネルギーに対する低速陽電子発生効率がまとめられた文献¹²⁾の値を用いて評価すると、16 MeV-90 kWの電子ビームで $3 \times 10^8 \sim 3 \times 10^9$ 個/秒の低速陽電子が発生できる能力があることがわかる。CW加速器を利用すれば、現状の世界トップレベルの低速陽電子発生装置が実現でき

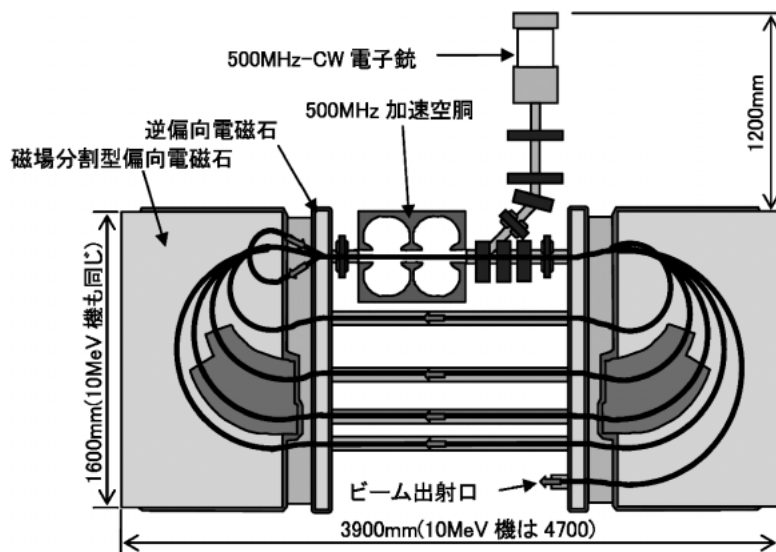


図3 5 MeV CW マイクロトン・プロト機の平面図

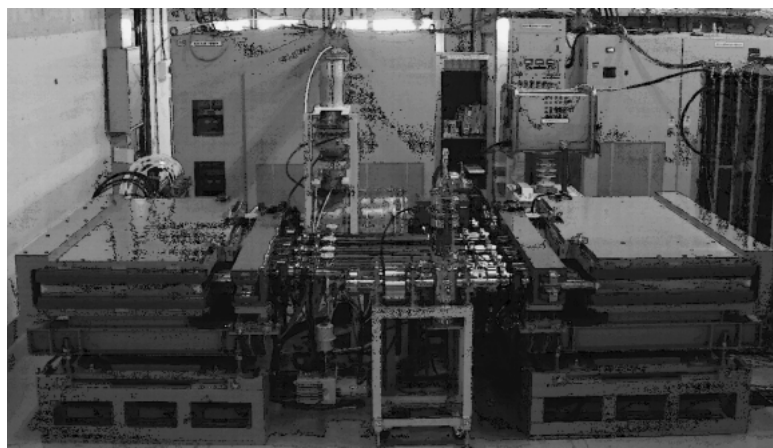


図4 5 MeV CW マイクロトンと高周波電源

ると考えている。

4. ラップトップ加速器

現在我々が開発を行っているラップトップ加速器¹³⁾に関し紹介させていただく。現状よりオーダーレベルの低コスト、コンパクトな加速器を実現し、産業用機器（例えばレーザ）と同程度に社会に普及させることを狙った装置開発である。1 オーダ以上の低コスト化を実現する為に、円形の誘導加速方式を採用した。40 年程前に研究が行なわれていたベータトロン加速器をベースに、新たな加速手法、最新のパワー半導体技術、磁性材料技術、電磁界・ビームシミュレーション技術を融合し、掌サイズの電子加速器開発を目指している。検討を開始した 1994 年頃は FFAG 加速

器にステラレータ磁場を追加しビーム収束を行う方式の検討を行っていたが、コンパクト性と低コスト性を最優先に考え、変形ベータトロン方式に加速方式を変えた。戦後のベータトロン開発時と比較して以下の様な技術革新があるので、オーダーレベルの低コストでコンパクトな加速器が実現できると考えている。

- 磁性材料技術の進歩：従来は交流電磁石の材料は電磁鋼板を使用していた。電磁鋼板は微細な 3 次元加工が難しく、また磁歪による騒音が大きい。最近、絶縁された鉄粉を圧縮成型して製造される軟磁性材料の技術進歩が著しく、産業用機械や自動車部品に適用する動きが加速している。上記材料は、3 次元加工が容易で、磁歪による騒音が殆どなく、飽和磁束密度も 1.5 T 以上と円形誘導加速器の偏向電

磁石や誘導加速コアに用いるのに最適である。また、騒音が小さいことは医療用加速器の様に患者の近くで使用する機器には必須の特徴である。

- パワー半導体の進歩：産業用や自動車・交通用の需要が急拡大する中、IGBT等のパワー半導体の高性能化、低コスト化が進み、周波数がkHzオーダの交流電源がコンパクトで、しかも安く製作できるようになった。円形誘導加速器ではコストの大部分を電源が占めるので低コスト化に大きく寄与する。
- 解析技術の進歩：コンピュータ処理速度の向上とシミュレーション技術の進歩により、3次元の電磁場解析、ビーム軌道解析が実用レベルで可能になった。

我々はラップトップ加速器を医療診断装置やX線非破壊検査装置に適用できないかと検討を行っている。ラップトップ加速器を用いたX線発生源と同じように、周回軌道上にターゲットを配置し高輝度X線を発生させるX線発生源の研究として、シンクロトロン加速器を用いる装置¹⁴⁾やベータトロン加速器を用いる装置¹⁵⁾等がある。

ラップトップ加速器はハイブリッド加速手法を採用している。ハイブリッド加速とは、入射時はFFAGモードで偏向磁場概一定の加速を行い、その後、ベータトロンモードで、偏向磁場を変化させる加速手法である。低エネルギーの円形電子加速器の場合、電子ビーム出力の上限を決めるのは、空間電荷によるビーム発散力である。空間電荷の影響を小さくするには、加速中のビームサイズを大きくし、且つ、ベータトロン振動数を大きくする必要がある。平衡軌道を固定した場合には、ビームサイズとベータトロン振動数の関係は相反するので、両者を両立させるには平衡軌道を加速と共に移動させる必要がある。上記を実現する加速手法がハイブリッド加速である。図5に加速シナリオの一例を示す。以下の様な方式で加速を行う。

- 入射時はFFAGモードで運転する。即ち偏向磁場を一定にしたまま加速コアを励磁して誘導電界で加速を行う。入射した電子はエネルギーの増加と共に平衡軌道が外側に広がる。ある程度の加速電界強度があれば、電子ビームを連続的に入射できるので、入射完了時には、内側がエネルギーの低いビーム、外側がエネルギーの高いビームが同時に周回している状態になる。
- 入射終了後は、加速コアと共に偏向磁場も増加させるベータトロンモードで運転する。偏向半径の異なる個々の粒子の平衡軌道は加速とともに移動する。
- 出射時は偏向磁場の増加を止めるか、または小さく

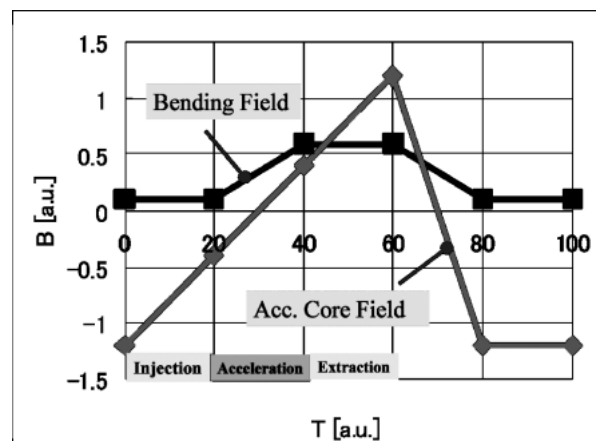


図5 ハイブリッド加速手法の加速シナリオ (Bending Field：偏向電磁石の励磁パターン、Acc. Core Field：誘導電界発生用加速コアの励磁パターン)

し、加速コアはベータトロンモードと同様に励磁する。入射時と同様に電子ビームの平衡軌道は外側にずれ、ターゲットに衝突する。

円形の誘導加速器(ベータトロン)ではベータトロン加速条件が良く知られている。即ち、 $2\Delta B$ (軌道) = ΔB (軌道内側平均) が成り立つ時に平衡軌道が一定に保たれ加速される。即ち、ビーム周回軌道上の磁場強度変化の2倍が、ビーム周回軌道内側の平均磁場強度の変化と等しい時に平衡軌道を一定に保ち加速される。平衡軌道が変化しない古典的ベータトロンの場合には、上記ベータトロン加速条件を成り立たせる様に偏向電磁石の励磁パターンと加速コアの励磁パターンを調整する必要がある。一方、ハイブリッド加速は入射時にはFFAGモードで運転するので、入射完了時には、軌道の内側から外側まで幅の広いビームが周回していることになる。幅広ビームの各位置のビームは異なる偏向半径の平衡軌道上を周回することになる。当然のことながら全ての平衡軌道上で $2\Delta B$ (軌道) = ΔB (軌道内側平均) を満足させることは難しい。よって、加速中は以下の様な3つの条件でそれぞれの位置の電子ビームは加速される。

- $2\Delta B$ (軌道) < ΔB (軌道内側平均)：半径が小さい位置を周回するビームは加速コアの強い磁束が支配的であり、この加速条件となる。加速中の電子ビームの偏向半径は加速と共に大きくなる。
- $2\Delta B$ (軌道) > ΔB (軌道内側平均)：半径が大きい位置を周回するビームは加速コアの強い磁束の割合が小さくなり、この加速条件となる。加速中の電子ビームの偏向半径は加速と共に小さくなる。

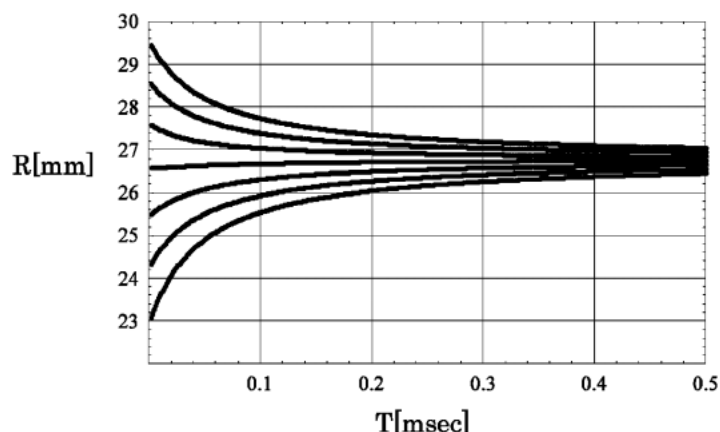


図6 ハイブリット加速手法におけるビーム収束効果

表4 ラップトップ加速器：基本パラメータ

最大エネルギー	1 MeV
入射エネルギー	30 keV
平均周回半径	0.03 m
繰り返し	1 kHz
加速器外径	180 mm

• $2\Delta B(\text{軌道}) = \Delta B(\text{軌道内側平均})$: ベータトロン加速条件が成り立つので加速中の軌道はほぼ一定に保たれる。

即ち、FFAGモードで水平方向に広がったビームは、それぞれの平衡軌道位置を変えながら加速される。図6に、個々の電子ビームの周回軌道半径が変化し、全体のビームサイズが小さくなっていく様子をビームトラッキングした結果を示す。入射終了直後 ($T=0$) に広がって周回していた電子ビームが、加速とともにベータトロン加速条件を満足する平衡軌道周辺に収束していく様子がわかる。

現状のラップトップ加速器の基本パラメータを表4に示す。片手に持てる程度の全体外径180 mmで、1 MeVまで加速可能な装置が実現できる。ラップトップ加速器を実現する為の機器製作上の大きな技術課題が軟磁性材料を用いたパルス電磁石が製作できるかどうかであった。日本原子力研究所の黎明研究の委託研究費用でパルス電磁石を試作¹⁶⁾した。図7に試作したパルス電磁石を示す。パルス電磁石は所定の磁場が発生できる見通しが得られ、軟磁性材料でパルス電磁石を製作できることが確認できた。ラップトップ加速器はパルス電磁石以外に誘導加速コア、電子銃、真空ダクト等で構成される。それぞれに技術課題があるが、家電製品や産業用機器の量産品開発の過程で得ら

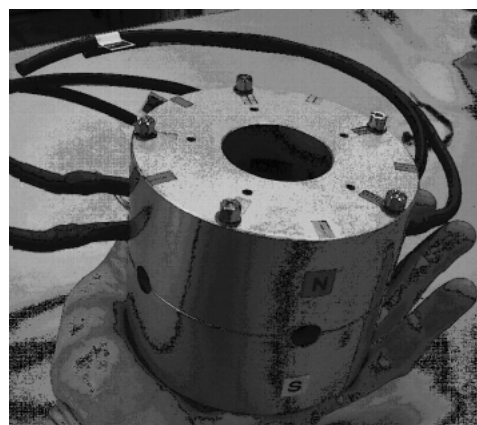


図7 ラップトップ加速器用パルス電磁石のプロト機

れた製造技術を採用することで、従来と比較して安価に機器を製作できることを実感している。

5. さいごに

国公立研究機関の大型加速器計画が立案され、その実現に向けて産業界と一緒に技術開発を行い、加速器技術力を蓄積する。その加速器技術を産業・医療利用の加速器事業に展開し企業が収益を上げ、社会が豊かになる。そして新たな大型加速器計画が立案される。これが加速器技術発展の良い循環であり、加速器技術の恩恵を社会に還元する1つの手段であると考えられる。現状の産業・医療利用の加速器は、がんの粒子線治療装置、がんのX線治療用電子ライナック、PET (Positron Emission Tomography) 用サイクロトロン等があるが、その事業規模は上記の循環を加速させる程には大きくなく、ビジネスとして成り立つ新たな量子ビーム利用分野と、産業・医療用加速器が求められている。その実現へ向けたキーワードをいくつか挙げ

させていただく。

- (1) 利用ニーズの開拓：事業規模拡大には潜在ユーザの開拓が必須である。ユーザ開拓には、「加速器を使う人」と「加速器を作る人」が同じであった時代の様に利用側と一体となった装置開発が必要である。
- (2) 低コスト，コンパクト，使いやすい，故障しない加速器：従来の加速器と比較するのではなく，加速器以外の産業・医療用機器と比べて勝てるスペックとする必要がある。
- (3) 異なる技術分野との融合：ロボット技術，レーザ技術等との融合で加速器利用ニーズが一層拡大する。また異分野の最新技術を導入することで加速器技術自体も高度化する。
- (4) 自由な発想：磁石の均一度は何々以下，電源の安定度は何々以下，といった常識に縛られると低コスト化は難しい。ビーム利用側の機能として要求されるスペックだけに縛られた自由な発想が必要である。

このようなキーワードを日々実践すれば，家庭や工場で加速器が必須となる利用分野が開拓され，且つ，加速器が自動車レベルに安価になり，1家に1台加速器が実現できるのではないかと考えている。なお，記載した産業・医療用加速器開発には，社内・社外の多くの方々に関係しており，また，用いている加速器技術のベースは国公立の研究機関の研究者が開発したものであることを申し添えます。

参考文献

- 1) T. Nakanishi et al., "Design of a Compact Storage Ring for Industrial Research", *Review of Scientific Instruments*, 63(1), p770, (1992).
- 2) K. Kise, H. Watanabe, K. Itoga, H. Sumitani and M. Amemiya, "Improvement of resolution in x-ray lithography by reducing secondary electron blur", *J. Vac. Sci. Technol. B* 22, p126, (2004).
- 3) R. D. Ruth, "A Canonical Integration Technique", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. NS-30, No. 4, p2669, (1983).
- 4) A. J. Dragt et al., *IEEE Trans. Nuc. Sci.* NS-32, No. 5, p2311, (1985).
- 5) J. M. Sanz-Serna, "Runge-Kutta Schemes for Hamiltonian Systems", *BIT* 28, p877, (1988).
- 6) T. Tanaka et al., "Beam Tracking of a Small Storage Ring", *Proceedings of the 2nd EPAC*, p1679, (1990).
- 7) H. Tanaka and T. Nakanishi, "Studies of Beam Dynamics of a Compact Storage Ring Using Superconducting Bending Magnets", *Review of Scientific Instruments*, 66(2), p1971, (1995).
- 8) H. Tanaka, "Beam Dynamics in a CW Microtron for Industrial Applications", *EPAC 2000, Vienna*, p1005, (2000).
- 9) 蒲他, "熱陰極 500 MHz-CW 電子銃の開発", *リニアック技術研究会*, (2003).
- 10) 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).
- 11) H. Tanaka and T. Nakanishi, "Slow positron production using an 18 MeV electron linac", *NIM B62*, p259, (1991).
- 12) 岡田, "世界のポジトロンラボラトリー", *PADIOISOTOPES*, Vol. 42, No. 7, (1993).
- 13) 田中, "FFAG とシンクロトロンハイブリッド加速手法", *Proceedings of the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology*, p78, (2003).
- 14) 山田, "卓上型シンクロトロン「みらくる 6X」による高品質 X 線の発生とその利用", *応用物理*, 第 74 巻, 第 4 号, p462, (2005).
- 15) V. V. Kaplin et al., "Thin betatron radiators for more efficient x-ray generation", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 73, No. 1, p63, (2002).
- 16) 田中, "ラップトップ型電子円形誘導加速器の研究", *JAERI-Conf 2004-014*, p156, (2004).