

話 題

FFAG とシンクロトロンをハイブリッド化した加速器の
コンパクト化技術

田中 博文*

Compact Accelerator with a Hybrid Acceleration Scheme between FFAG and Synchrotron

Hirofumi TANAKA*

Abstract

An ultra-compact 990 keV electron accelerator – called the “laptop accelerator” – that is only about the size of a human palm, with an external diameter of 150 mm and a weight of 10 kg has been developed. The device can emit an X-ray beam with a diameter of 10 μm . Expected applications are in non-destructive tests and diagnostic devices.

1. はじめに

加速器は荷電粒子を高エネルギー物理学の素粒子実験や原子核実験に用いるために開発されてきた。当初は実験室に入る大きさであったが、その後、より高エネルギーの荷電粒子が必要とされるようになり、加速器の設置エリアが数 km にわたるような大型の加速器が建設され稼動している。一方、産業利用・医療利用分野では、必要とされる機能が決まっており、その機能のみに絞って装置を高性能化、小型化、簡素化する開発¹⁾が行なわれている。

本論文で報告するラップトップ加速器は、高輝度の X 線を発生させるという利用側の 1 つの機能のみに絞り、加速器をできる限りコンパクトにするという方針で開発した加速器である。構成部品である、電磁石、電子銃、真空ダクト、X 線ターゲット、電磁石電源、高圧電源はラップトップ加速器専用のものを開発した。加速器以外の他の電磁機器やブラウン管等で開発した技術を横展開することで効率的に開発することができた。図 1 にラップトップ加速器の外観写真を、表 1 に基本パラメータを示す。加速手法は、大電流の電子ビームを加速する必要があるため、FFAG 加速とシンクロトロン加速をハイブリッド化した独自のハイブリッド加速手法を用いている。ハイブリッド方式はパラメータの選択により両方の加速手法の「良いとこ取り」、「悪いとこ取り」のどちらにも成り得るので、加速器の構

成部品の製造コストや製作性まで総合的に考えてパラメータ設計することが必須となる。

本論文では、最初にハイブリッド加速手法、第 2 にラップトップ加速器の構成機器、第 3 に加速試験と X 線撮

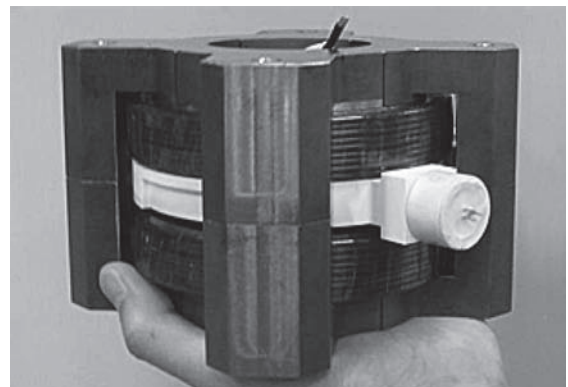


図 1 ラップトップ加速器の外観写真

表 1 ラップトップ加速器の基本パラメータ

加速粒子	電子
加速手法	ハイブリッド加速 (誘導加速)
加速エネルギー	990 keV
入射エネルギー	30 keV
加速繰り返し	1 kHz
周回電流 (パルス)	5 A
X 線の光源サイズ	10 μm
加速器本体寸法	(横) 15 cm × (奥行) 13 cm × (高さ) 10 cm
重量	10 kg

* 三菱電機 先端技術総合研究所
(E-mail: Tanaka.Hirofumi@ap.MitsubishiElectric.co.jp)

像, 第4にハイブリッド加速手法をRF 加速器へ適用した概略設計例に関し報告する.

2. ハイブリッド加速手法

本章ではハイブリッド加速の加速方法²⁾ に関し記載する. 円形加速器では運動量 P は電気素量 e , 偏向磁束密度 B , 偏向半径 R の積で表わせる. 時間 t で微分した運動量の増加 dP/dt は以下の式で表わせる.

$$dP/dt = eR dB/dt + eB dR/dt$$

従来の円形加速器では加速とともに偏向磁束密度 B (右辺の第1項), 又は, 偏向半径 R (右辺の第2項) のいずれかを変化させていた. 例えば, シンクロトロンやベータトロンでは加速中に偏向磁束密度 B を変化させ偏向半径 R は一定で加速を行うが, サイクロトロンやFFAG 加速器では偏向磁束密度 B を一定とし, 偏向半径 R を変化させて加速を行う. ハイブリッド加速手法は偏向磁束密度 B と偏向半径 R の両方を変化させて加速を行なう. 具体的には, 加速初期には偏向半径 R を徐々に大きくし幅の広いビームを周回させることで, 低エネルギー時のクーロン反発力 (空間電荷効果) の影響を抑える. その後は偏向磁束密度 B を加速とともに強くしていき偏向半径 R の増大を抑える. 比較的複雑な電源制御が必要になるので, 大型の加速器の場合には費用対効果を十分に検討する必要があるが, 小型の加速器ではIGBT やMOSFET 等の半導体素子を用いた特殊な電磁石電源を開発すれば, 比較的低コストでハイブリッド加速を用いた加速器が実現できる.

図2に加速シナリオの一例を示す.

円形の誘導加速器ではベータトロン加速条件が良く知られている. 即ち, 軌道上の平均磁束密度 B_{orbit} の2

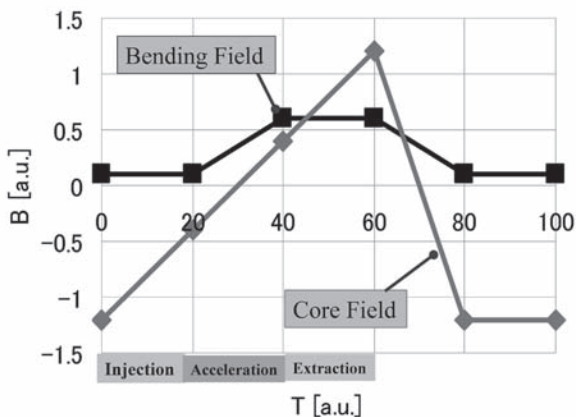


図2 ハイブリッド加速手法の加速シナリオ (縦軸は磁束密度, 横軸は時間. Bending Field : パルス偏向電磁石の励磁パターン, Core Field : 誘導電界発生用加速コアの励磁パターン)

倍が軌道内側の平均磁場 B_{acc} に等しい時に平衡軌道を一定に保ち電子ビームが加速される. 平衡軌道が変化しない古典的なベータトロンでは, 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, 周回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平衡軌道上を周回することになる. 加速中の全ての平衡軌道上で $2 B_{orbit} = B_{acc}$ を満足させることは不可能である. 加速中の個々の粒子は以下の3つの条件でそれぞれの平衡軌道上で加速される.

- $2 B_{orbit} < B_{acc}$: 平均半径が小さい位置を周回する電子ビームは加速コアの強い磁束が支配的となり, 上記の加速条件となる. この領域の粒子は加速中の平衡軌道は加速と共に外側にずれていく.
- $2 B_{orbit} > B_{acc}$: 平均半径が大きい位置を周回する電子ビームは加速コアの強い磁束の割合が小さくなり, 上記の加速条件となる. この領域の粒子は加速中の平衡軌道は加速と共に内側にずれていく.
- $2 B_{orbit} = B_{acc}$: 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の平衡軌道に保たれる.

即ち, 入射時に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化させながら加速される. 加速中に平衡軌道を一定に保つ偏向半径は偏向電磁石と加速コアの励磁パターンを変えることで調整することができる.

今, 加速コアの半径を r_c , 加速コアの磁束密度を B_c , 偏向電磁石の軌道最内側の半径を r_i , r_i での磁束密度を B_i とすれば, FFAG 磁場という前提を設けることで, 軌道上の平均磁束密度 B_{orbit} , 軌道内側の平均磁束密度 B_{acc} は以下の式で表せる. これらの2式の関係性を調整することで, 加速中のビーム径や電子密度分布を調整

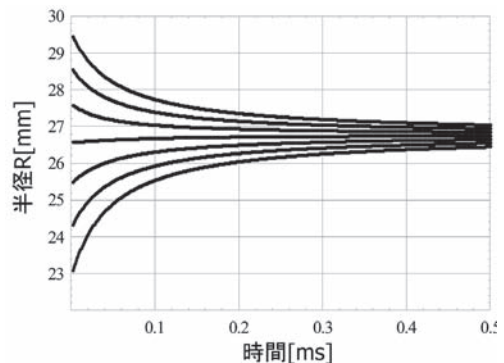


図3 入射直後水平方向に広がった電子ビームが加速とともに絞られていく状況のビーム解析例

することが可能となる。

$$B_{orbit} = B_i \left(\frac{r}{r_i} \right)^k$$

$$B_{acc} = B_c \left(\frac{r_c}{r} \right)^2 + B_i \left(\frac{2}{(k+2)r_i^k} \right) \frac{r^{k+2} - r_i^{k+2}}{r^2}$$

3. ラップトップ加速器

図4にラップトップ加速器の本体構成図を、また図5に加速器の分解写真を示す。全幅15 cm、高さ10 cm、重さ10 kgと手のひらに載る程度にコンパクト化することができた。同等エネルギーまでの加速を行う従来の非破壊検査用のSバンド線形加速器は全長が100 cm、重さ350 kg程度であり、ラップトップ加速器は従来と比べてオーダーレベルのコンパクト化が実現できたことになる。

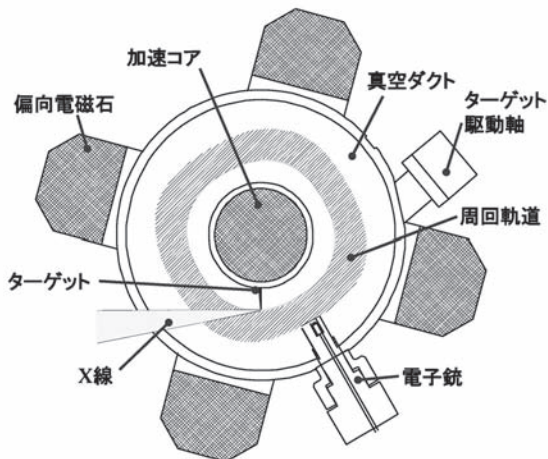


図4 ラップトップ加速器の本体構成図

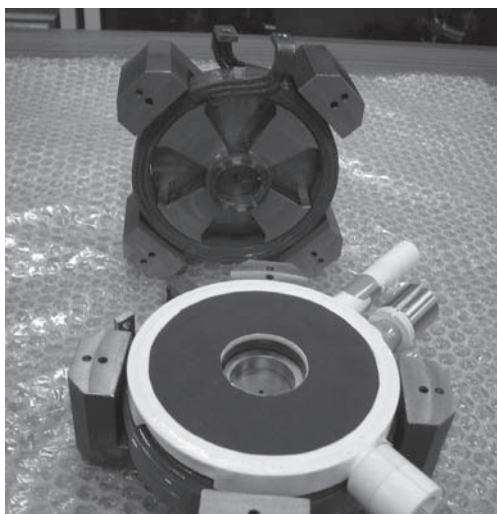


図5 ラップトップ加速器の電磁石内に真空ダクト、電子銃、X線ターゲットを組み込んだ写真

電子銃で発生した電子ビームは偏向電磁石で曲げられ、ドーナツ状の真空ダクト内を周回し、図中の周回領域を数十万周回しながら誘導加速により徐々に加速される。最高エネルギーまで加速した後、電子ビームの周回軌道の半径を徐々に小さくし、真空ダクトの内側に配置した微小なX線ターゲットに電子ビームを徐々に衝突させることで、衝突方向に微小光源サイズのX線を発生させることができる。本体の構成機器である偏向電磁石、電子銃、真空ダクト、X線ターゲットや、電子銃高圧電源、偏向電磁石電源は、従来の加速器と異なる特殊仕様であるため、全て新規に設計・製作を行った。以下に構成機器に関し記載する。

3.1 電子銃

電子銃はエネルギー30 keVの熱電子放出タイプである(図6参照)。カソードはブラウン管用電子銃と同じ材料を用いており、ニッケルにカソード用酸化物を50 μm塗布して作成した。また、ブラウン管用電子銃で用いるタングステンヒータ2個でカソードを加熱する構成とした。酸化カソード面を凹型に湾曲させ、電子銃から絞られた電子ビームが発生できる構造にした。これらの電子銃電極形状は空間電荷効果を考慮したビーム解析と電界解析を連成した最適化により決定した。電子銃で発生した電子が1周回した後で電子銃のアノード部に衝突しないように、カソードとアノード間の距離をできるだけ接近させ、最高60 kV/mmの非常に高いパルス電界をかける。電子銃高圧電源は電圧30 kV、パルス幅2 μs、繰り返し1 kHzのパルス高電圧を発生させるIGBT駆動のトランス昇圧型高圧電源を開発した。

3.2 偏向電磁石、及び、電磁石電源

偏向電磁石は4つの磁極、加速器中心部の加速コア、及び、リターンヨークが一体となった構造である。磁極の外観写真を図7に示す。磁極材料は表面が絶縁された鉄粉を圧縮成型した軟磁性材料を用いており、渦電流が小さく、繰り返し1 kHzの交流運転が可能である。磁石は切削により整形し、磁極形状の製作精度は±0.05 mmで製作した。偏向電磁石のビーム軌道



図6 電子銃外観写真

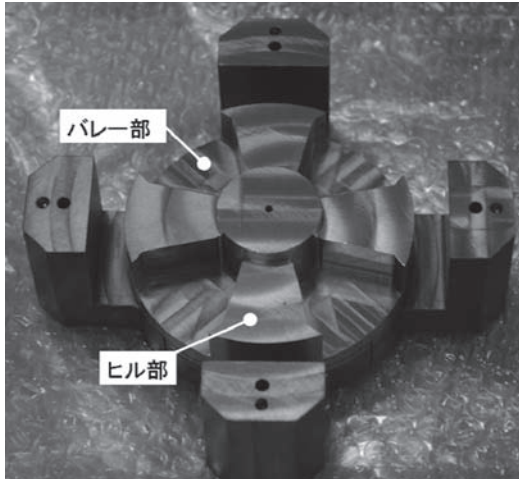


図7 偏向電磁石磁極の外観写真

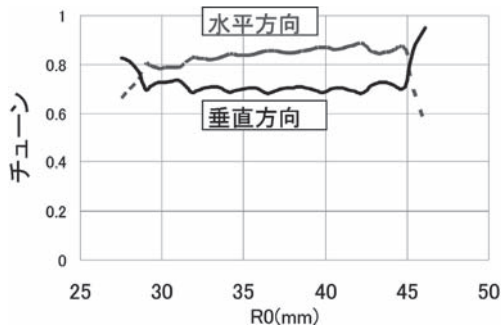


図8 ラップトップ加速器のベータトロン振動数(ビームが周回する領域である平均半径 R_0 が 30 mm から 45 mm の領域でベータトロン振動数(チューン)が一定となるように磁極形状を最適化した.)

平面上の磁束密度は約 0.2 T、加速コアの磁束密度は約 0.6 T である。電子ビームは 4 つの偏向電磁石の出入り口部の漏洩磁場を用いてビーム収束を行う強収束系である。偏向半径が異なる広い領域でベータトロン振動数が概一定となるように偏向電磁石のヒル部とパレー部の磁極形状を決定した。電磁石の主コイルは 4 つの偏向電磁石と加速コアで共通コイルとしている。電子銃から出た電子ビームを周回軌道に入射させ、且つ、加速した電子ビームを X 線ターゲットに衝突させるために用いる入射・出射コイルを偏向電磁石の 1 つの磁極表面に設置している。

偏向電磁石の主コイルには 100 A-200 V で繰り返し 1 kHz の正弦波状の交流電流を流す必要がある。偏向電磁石のコイルは殆ど電力をロスしないことに着目し、コイルと並列に共振コンデンサを配置し、LC 共振回路とし、電力ロス分だけを偏向電磁石電源から供給する共振型電源を製作した。これにより 1 kW 未満の電磁石電源を用いて上記スペックの電流を主コイルに流すことが可能になった。また、加速器を駆動する電磁石電源の大きさは、入射・出射用電磁石電源を含めて、



図9 電磁石電源、及び、ラップトップ加速器電磁石と共振コンデンサの外観写真

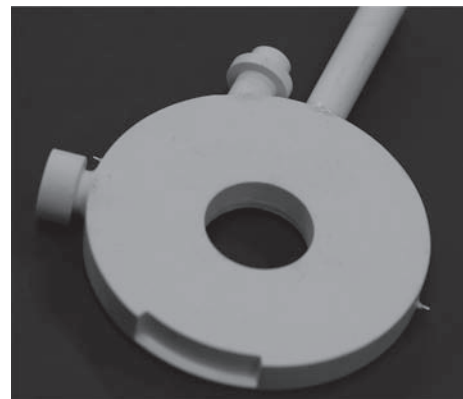


図10 真空チェンバー外観写真

35 × 60 × 45 cm³、重さ 40 kg 弱とコンパクト化することができた。図9に電磁石電源、及び、ラップトップ加速器と共振コンデンサの外観写真を示す。

3.3 真空チェンバー、及び、X線ターゲット

真空チェンバーは、マシナブルセラミックで製作した。チェンバー内面は電子ビームが衝突しても電荷が蓄積することがないように液晶ディスプレイで使用する導電性コーティング (ITO 膜) を実施し、真空チェンバーに衝突した電子を外部の GND に逃がす構成とした。真空チェンバーの肉厚は最も薄い位置で 1 mm とした。真空ポンプは原理実証機では外付けのターボ分子ポンプを用いた。実用化時には真空ダクトを強化ガラスで製作し真空ダクト内部にブラウン管で用いるゲッター材を配置して封着する予定である。真空チェンバーの上下面の偏向電磁石の磁極と接する部分には振動防止用のダンパー(図5の黒い部分)を貼り付けた。ダンパーがないと偏向電磁石を 1 kHz で励磁する時に発生する微小振動が X 線ターゲットに伝わり画像にボケが発生する。

X 線ターゲットは先端の直径が 7 μm の針状のタングステンを用いた。電子ビームの周回軌道を内側に移動させると約 2 万周回する間に徐々に X 線ターゲット

に電子ビームが衝突し、高輝度の X 線を発生させることができる。1 度 X 線ターゲットに衝突した電子ビームはエネルギーを失い、ターゲットの先端以外の部分に衝突する可能性があるためターゲットの反対部にビームダンプを設置し除去する構成にした。当初は、X 線発生によるエネルギー損失が小さい電子ビームは再利用できる可能性が高いと考えていたが、ビームダンプを設置しないと X 線の光源サイズが大きくなり、微小光源サイズを実現できなかった。

4. 加速試験と X 線撮像試験

4.1 加速試験

図 11 にラップトップ加速器の加速波形と X 線検出器の出力波形を示す。オシロスコープ波形の上側から、X 線測定器出力、偏向電磁石励磁電流、電子銃高圧電源電圧、入射・出射用電磁石励磁電流である。偏向電

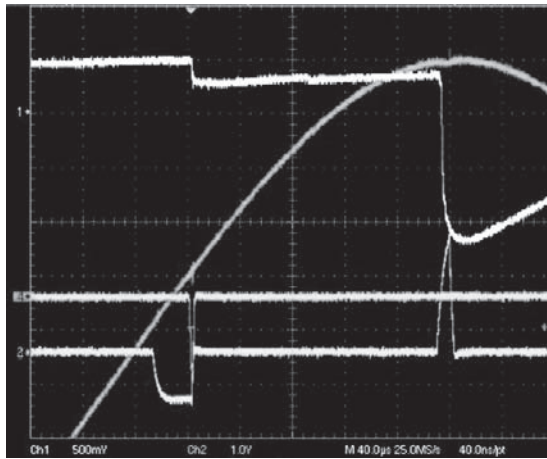


図 11 加速試験におけるオシロスコープ波形①

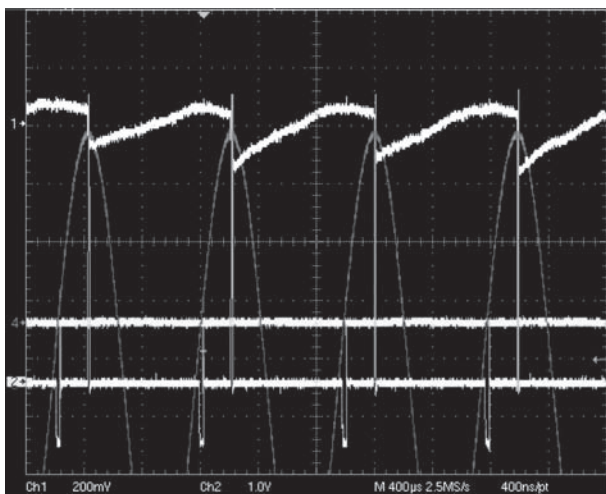


図 12 加速試験におけるオシロスコープ波形②(上から、X 線測定器出力、偏向電磁石励磁電流、電子銃高圧電源電圧、入射・出射用電磁石励磁電流波形)

磁石励磁電流が電子ビームの加速エネルギーとほぼ比例の関係にある。X 線測定器は、光源点から 2 m 離れた位置に配置したシンチレーションモニタを用いており X 線の出力が大きい程オシロスコープの負側(写真の下側)に大きな出力となる。入射効率が 10%程度と低いので電子ビームを入射するタイミングで、X 線が若干発生する。

その後、X 線ターゲットに衝突させるために出射用電磁石を徐々に励磁するタイミングで強い X 線が発生することがわかる。加速エネルギーは偏向電磁石の励磁電流 (CT で測定) と磁束密度を予め磁場測定により測定しておき、周回半径から計算により導出した。

図 12 に 4 回の加速繰り返し時 (4 ms 間) のオシロスコープの波形を示す。入射時に発生する X 線が X 線測定器に検出されない様に検出器前面にスリットを配置して測定を行なった。繰り返し 1 kHz で X 線が発生できていることがわかる。なお、この軟磁性材料を用いても 1 kHz 運転で数 10 分運転すると偏向電磁石の磁極の温度が上昇するので偏向電磁石全体をファンにより空冷している。装置が熱により壊れることは無いが、X 線ターゲットが真空ダクト中に格納されているので温度上昇による磁極全体の熱膨張により X 線の光源点がずれる等の問題が発生するので注意が必要である。

4.2 X 線撮像試験

X 線による透視法は、胸部 X 線写真のように透視対象の X 線吸収率の差で生ずる濃淡を利用した吸収撮像が一般的であるが、近年では X 線の屈折率の差で生ずるわずかな屈折を利用した屈折撮像が注目を集めている³⁾。屈折撮像は従来の吸収撮像と比較して物質境界のコントラストが高く、吸収撮像では区別が難しい臓器中の組織差や微小がんが検出できる可能性があり、医療診断での利用が期待されている。屈折撮像を行うには、光源点の位置を明確化する必要がある。X 線光源の発生点径が小さいか、または、平行にそろった X 線が必要であり、従来は大規模な放射光施設での実用研究が中心であった。ラップトップ加速器は先端が $7 \mu\text{m}$ の針状の X 線ターゲットに電子ビームを徐々に衝突させ、発生点径約 $10 \mu\text{m}$ の X 線が発生可能であり、屈折撮像が可能なコンパクトな X 線光源である。

図 13 は直径 1 mm の球状水滴の X 線撮像シミュレーション画像の一例を示す。左側が X 線の光源サイズが 1 mm の場合、右側が $10 \mu\text{m}$ の場合である。光源サイズが大きい場合には物質に遮られた部分の X 線強度が弱くなる吸収画像である。一方、光源サイズが小さい場合には物質境界の屈折効果により境界部の X 線は若干外側に曲げられる。光源サイズが小さい場合には、

境界部より少し外側の X 線強度が強くなり、すこし内側の X 線強度が弱くなり、エッジが強調され、物質境界のコントラストが高い画像を得ることができる。一方、光源サイズが大きい場合にはぼけるので、物質に遮られた部分の X 線強度が単に弱くなる吸収画像が得られる。ラップトップ加速器で撮影した X 線画像は、撮像体と検出器の距離を所定の距離だけ離せば境界部分がエッジ状に強調されたくっきりした X 線撮像が可能であることが確認できた。またエッジ形状から X 線光源点サイズを見積もった結果、光源点サイズは $8 \mu\text{m}$ から $12 \mu\text{m}$ 程度であることを確認した。図 14 に直径 $7 \mu\text{m}$ のカーボン線の撮影画像を示す。原理検証用のラップトップ加速器は $\phi 8 \text{ mm}$ のセラミックダクトを通して外部の真空ポンプにより排気しているため、電子銃の酸化カソードの寿命が短く、長時間の安定な撮像試験は難しかった。また、ラップトップ加速器の電子ビーム強度は X 線ターゲットの熱溶融により上限が制限されている。即ち、医療現場で直ぐに導入が可能であるような、吸収撮像画像を従来の X 線管と同じ時間 (0.1 秒以下) で撮影し、且つ、屈折撮像も撮影することは、現状では難しい。よってラップトップ加速器の医療利用は、屈折撮像の有効性が十分に実証された後と考えている。

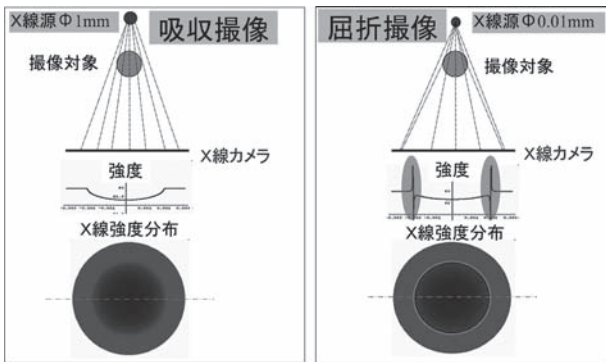


図 13 直径 1 mm の水滴の X 線解析画像

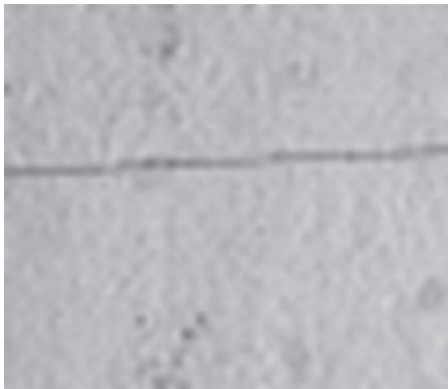


図 14 直径 $7 \mu\text{m}$ のカーボン線の撮影画像

5. RF 加速器への適用

ラップトップ加速器の様に誘導加速を行なう加速器の場合には、1 周の周回時間が異なる荷電粒子でも加速することができる。即ち、ハイブリッド加速において、入射後に FFAG モードで加速を行った時の平衡軌道が異なる荷電粒子を同時に加速することは誘導加速では容易である。一方、RF 加速の場合には、荷電粒子の周回周波数と RF 加速周波数の差がある値以下でないと加速することはできない。とはいうものの、ハイブリッド加速をシンクロトロン加速と比べると横方向(径方向)のアクセプタンスが著しく大きいので加速可能な荷電粒子は多い。定量化の為に、縦方向、横方向の運動を考慮した詳細なビーム解析が必要になる。

ハイブリッド RF 加速とシンクロトロン RF 加速の特徴を表 2 にまとめる。表からわかる様に、ハイブリッド RF 加速を用いると、条件を選べば偏向磁場強度を高く、且つ、収束電磁石なしで収束力を確保できるので、加速器全体の寸法をコンパクト化することができる。また、水平方向のアクセプタンスが大きく、入射時の RF バケットを高くすることができる。更に、入射・出射の際に平衡軌道をずらすといった制御自由度が高い。一方、平衡軌道を加速中に変化させるので、偏向電磁石、RF 空洞、真空ダクト等の必要有効アパーチャがシンクロトロンより大きくなるのでコスト高になるという短所を持つ。偏向磁場強度の最大値は使用する積層鋼板の磁気特性と、電磁石電源スペックから決まる。

ハイブリッド加速方式と FFAG 加速方式を比較すると、ハイブリッド加速方式が大きなエネルギーゲイン

表 2 ハイブリッド RF 加速とシンクロトロン加速

	ハイブリッド	シンクロトロン
入射時の RF バケット高さ	水平方向のアクセプタンスが大きく、RF バケットを高くすることができる	ハイブリッド程は高くできない
偏向磁場強度	高エネルギー時に平衡軌道を移動させれば、磁極ギャップを小さくでき、1.9 T 程度の高磁場での運転が可能	入射時に垂直方向のアパーチャが必要で、磁場強度は 1.5 T ~ 1.7 T 程度
偏向電磁石	平衡軌道を移動させる分だけ、大きな磁石が必要	小さな磁石で良い
収束電磁石	必要なし	一般に必要*
RF 空洞	横方向に大口径のビームアパーチャが必要	小口径のビームアパーチャで良い

* 機能結合型シンクロトロンなら不要

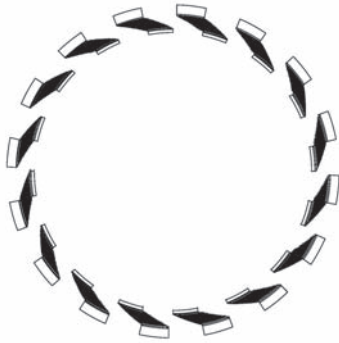


図 15 炭素 400 MeV/u のハイブリッド加速器の偏向電磁石の配置例

表 3 炭素 400 MeV/u ハイブリッド加速器の基本パラメータ

	パラメータ
加速種	C ⁶⁺
エネルギー	4 ~ 400 MeV/u
平均偏向半径	7.00 ~ 7.48 m
セル数	16
K 値	12
スパイラル角	65 度
最大磁場強度	1.9 T

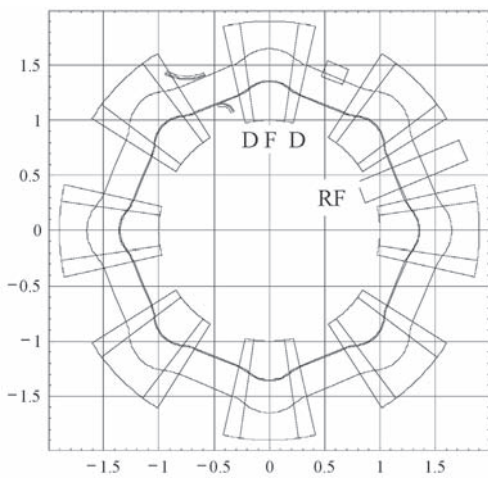


図 16 炭素 7 MeV/u のハイブリッド加速器の偏向電磁石配置例

を得ることが可能である長所を持つが、偏向電磁石磁場を変化させるので、高繰り返し加速ができないという短所を持つ。ラップトップ加速器では 1 kHz という高繰り返しが実現できているが、大型の加速器では電磁石電源で繰り返し周波数の上限が決まる。数 Hz 程度の繰り返しで良いが、1 回の加速で大電流の荷電粒子を加速したい利用分野に有効になる加速方式であると考えている。

図 15 に炭素 400 MeV/u のハイブリッド加速器の磁石配置例、及び、表 3 に基本パラメータを示す。スパ

表 4 炭素 7 MeV/u ハイブリッド加速器の基本パラメータ

	パラメータ
加速種	C ⁴⁺
エネルギー	0.035 ~ 7 MeV/u
平均偏向半径	1.35 ~ 1.8 m
セル数	8
K 値	0.7
ラティスタイプ	DFD

イラル角が 65 度とかなり大きいですが、平衡軌道の加速中の変化の幅を小さく設計しており、それほど複雑なスパイラル磁石とはならず、積層鋼板で製作可能であることがわかった。また、図 16 に炭素 7 MeV/u のハイブリッド加速器の磁石配置例、及び、表 4 に基本パラメータを示す。低エネルギーの入射ビームの取り扱いの煩雑さはあるが実現可能なパラメータであると考えている。

6 ま と め

FFAG とシンクロトロンをハイブリッド化した加速手法を用い電子ビームを 990 keV の高エネルギーまで加速できるラップトップ加速器の原理検証用プロト機を試作した。ビーム試験の結果、990 keV までのビーム加速と X 線撮影に成功した。今後は、高エネルギー X 線がコンパクトな装置で発生できるというラップトップ加速器のメリットが生かせる非破壊検査等の分野で事業成立の見通しが立てば、信頼化技術を確認し実用化を目指していく予定である。

また、ハイブリッド加速を RF 加速器へ適用した概略設計例を紹介した。1 回の加速で大電流の高エネルギー荷電粒子が必要となる利用分野に有効であると考えている。

ラップトップ加速器の開発では、弊社の研究所や製作所、試作をお願いした会社等の多くの方々の多大なご尽力があったことを申し添えます。

参考文献

- 1) J. Pottier, A new type of rf electron accelerator: The rhodotron, Nucl. Instr. and Meth. B 40/41, 943-945, 1989
- 2) H. Tanaka, T. Nakanishi, HyBrid Accelerator using an FFAG Injection Scheme, The 17th International Conference on Cyclotrons and Their Applications, 465-467, 2004
- 3) S. W. Wilkins, T. E. Gureyev, D. Gao, A. Pogany, A. W. Stevenson, Phase-contrast imaging using polychromatic hard X-rays, Nature 384, 335-338, 1996