

Beam Test of an Ultra-compact Electron Accelerator using Hybrid Acceleration Scheme

Hirofumi Tanaka¹, Takahisa Nagayama, Nobuyuki Zumoto, Kazuo Yamamoto, Kenichi Koyama
 Mitsubishi Electric Corporation
 8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo, 661-8661

Abstract

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

ハイブリッド加速手法を用いた手のひらサイズ加速器の990keV電子ビーム加速試験

1. はじめに

加速器は高エネルギーの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。また、加速器から発生する放射光や中性子ビームを用いて、材料研究や新薬研究等に用いられている。加速器の勃興期は、加速器を用いて実験を行う研究者が加速器の開発も実施していたが、加速器が大規模になるにつれて、加速器専門の研究者が生まれ、更に加速器の機器毎の高性能化に研究の中心が移ってきており、加速器開発者と利用者の分業が進んでいる。加速器利用側からのニーズにより考案された加速器の例としては、医療用器具や食品等の滅菌や殺菌用に開発された大出力の電子加速器^[1]等があるが、あまり例がない。

本論文で記載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1つの機能に絞って、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。本論文では、最初にハイブリッド加速手法に関し記載し、次にラップトップ加速器の構成と加速試験結果を記載し、最後にX線の撮像結果に関し記載する。

2. ハイブリッド加速手法

円形加速器の中の1加速手法であるシンクロトロン加速は何度も同じ加速電極を通過させるので、低コストでコンパクトな装置を実現できるという特長を持つが、同じ軌道上を多周回させるので荷電粒子間のクーロン反発力によりビームが発散し、大電流加速が難しいという課題があった。一方、周回加速する毎に円軌道の半径を大きくし、螺旋軌道を形成するサイクロトロン加速は、クーロン反発力を抑制

することができるが、装置が大規模になるという課題がある。筆者は上記の円形加速器の課題を解決する為にハイブリッド加速という加速手法を考案した。以下にその加速手法に関し説明する。

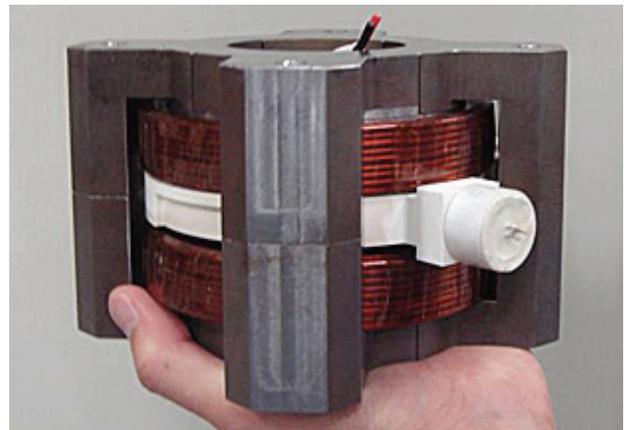


図1 ラップトップ加速器の外観

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 μ m
加速器本体寸法	(横)15cm×(奥行)13cm×(高さ)10cm
重量	10 kg

円形加速器ではエネルギーに関係する量である運

¹ E-mail: Tanaka.Hirofumi@ap.MitsubishiElectric.co.jp

動量Pは電荷素量e、偏向磁場B、偏向半径Rの積で表わせる。よって、上記の関係式を時間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場Bか偏向半径R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場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加速器では偏向磁場Bが一定で、偏向半径Rを変化させ加速を行う。ハイブリッド加速手法^[2]は偏向磁場Bと偏向半径Rの両方を変化させる。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、低エネルギー時に大きな影響があるクーロン反発力の効果を抑える。その後は偏向磁場Bを加速とともに強くしていき偏向半径Rの拡大を抑制する。比較的複雑な電源制御が必要になるので、大規模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、小型加速器の場合にはIGBTやMOSFETといった半導体素子を用い独自開発の電源を用いることで比較的低コストで装置が実現できる。

3. ラップトップ加速器

図1にラップトップ加速器の本体外観写真を示す。また表1にラップトップ加速器の基本パラメータを示す。加速器本体は全幅15cm、高さ10cm、重さ10kg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Sバンドの線形加速器では全長が100cm、重さ350kg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。また、加速器を駆動する電源の大きさも、従来の加速器の60×160×80cm³、重さ360kgに対して35×60×45cm³、重さ40kgとコンパクト化できた。

図2にラップトップ加速器の構成機器を示す。電子銃で発生した電子ビームはドーナツ状の真空ダクト内の矢印方向に出射され、偏向電磁石で曲げられて真空ダクト内の図中斜線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、電子銃電源、偏向電磁石電源は、従来の加速器と大きく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。

電子銃はエネルギー30keVの熱電子放出タイプであり、カソードはニッケルに酸化カソードを塗布しタンダステンヒータ2個で加熱する構成である。酸化カソード面を凹型に湾曲させることで絞られた電子ビームを発生させることができる。電子銃で発生した電子が1周回した後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、30kV/mmの強電界をかける。電子銃高圧電源は電圧30kV、パルス幅2μs、繰り返し1kHzのパルス電圧を発生させるIGBT駆動のトランス昇圧型電源を開発した。

偏向電磁石は4つの磁極と加速器中心部の加速コアが一体となった構成である。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1kHzの交流運転が可能である。偏向電磁石の磁場強度が約0.2T、加速コアの磁場強度が約0.6Tである。電子ビームは4つの偏向電磁石の出入り口部での漏洩磁場を用いてビーム収束を行う強収束系であり、偏向半径が異なる広い領域でベータトロン振動数がほぼ一定となるように偏向電磁石境界部の磁極形状を工夫している。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。

ラップトップ加速器の構成機器

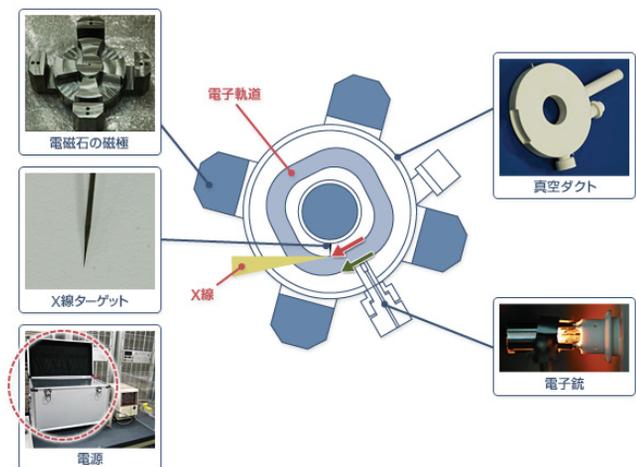


図2 ラップトップ加速器の構成機器

偏向電磁石の主コイルには100A-200Vで繰り返し1kHzの交流電流を流す必要がある。工夫しないと20kWの大型の電磁石電源が必要となり高コストになる。偏向電磁石のコイルでは殆ど電力をロスしないことに着目し、コイルと並列にコンデンサーを配置し、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1kW未満の電磁石電源で上記スペックの電流を主コイルに流すことが可能となった。

真空ダクトは、マシナブルセラミックで製作し、ダクト内面は電子ビームが衝突しても電荷が蓄積しないように導電性コーティングを行った。真空ダクトの肉厚は最も薄い位置で1mm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等で製作し真空ダクト内部に吸着ポンプを設置して封着する。

X線ターゲットは先端の直径が7μm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、X線が発生する。

図3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、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（図の下側）に大きな出力となる。X線測定器出力は電子ビームが入射されるタイミングで若干発生し、X線ターゲットに衝突させるために出射用電磁石を励磁したタイミングで強いX線が発生していることがわかる。

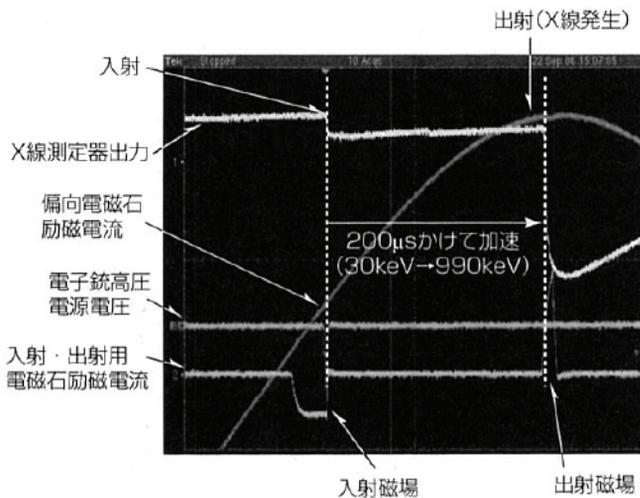


図3 ラップトップ加速器の加速波形とX線検出器でのX線強度波形

4. X線撮像実験

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がくっきり見え、吸収撮像ではほとんど区別がつかなかった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り、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 μmの針状のX線ターゲットに加速した電子ビームを徐々に衝突させ、発生点径が10 μmのX線が発生可能であり、屈折撮像が可能なX線光源である。

図4は直径1mm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1mmの場合、右側が10 μmの場合である。光源サイズが大きい時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

さい時には物質境界の屈折効果により境界部のX線が若干外側に曲げられるので、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線強度が弱くなる。このような仕組みで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。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に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を確認できた。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 μmから12 μm程度であることを確認できた。

1 X線の吸収撮像と屈折撮像

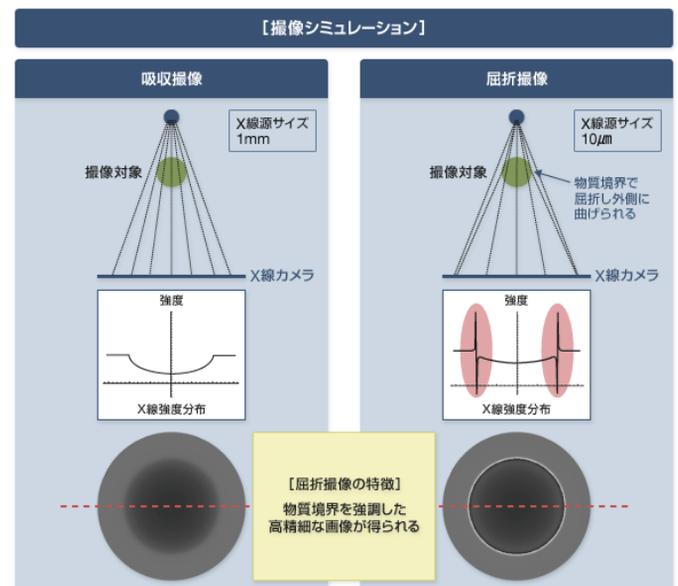


図4 直径1mmの水滴のX線解析画像

5. まとめ

ハイブリッド加速手法を用い、電子ビームを990keV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。実験の結果、990keVまでのビーム加速試験と屈折撮像特有の境界部が強調されたX線撮影に成功した。今後、ラップトップ加速器の信頼性や大出力化技術を確立し、産業・医療利用のX線光源として実用化を目指していく予定である。また、ハイブリッド加速のイオン加速器への適用検討を進める。

参考文献

- [1] J. Pottier, A new type of rf electron accelerator, 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