

乾電池駆動可搬型高エネルギーX線発生装置の開発

— X線非破壊検査におけるイノベーションを目指して —

鈴木 良一

電子加速器の小型化及び省エネルギー化、乾電池駆動超小型電子加速器という産総研の有する要素技術と、企業が開発したカーボンナノ構造体電子源の技術を統合することによって、単三乾電池1個で駆動し、100 keV以上の高エネルギー高出力X線を発生でき、高精細なX線透過像を得ることができる実用的な可搬型X線発生装置の開発に成功した。本稿では、これらの要素技術について述べるとともに、各要素技術がいかに成果に結びついたかについて考察する。

キーワード：X線、非破壊検査、乾電池駆動、電子加速器、省エネルギー

Development of battery-operated portable high-energy X-ray sources

– Innovation in X-ray non-destructive-evaluation –

Ryoichi Suzuki

We have developed a practical portable high-energy X-ray source, which can generate high energy X-rays with energies greater than 100 keV enabling the taking of high-definition X-ray transmission images using an R6(AA) battery as a power source. This result is a consequence of the integration of the compact and energy-saving electron accelerator technologies of AIST and the carbon nanostructure technologies of private companies. In this paper, we discuss these elemental technologies and how to integrate them.

Keywords: X-ray, non-destructive evaluation, battery operated, electron accelerator, energy saving

1 はじめに

日本には、高度成長期に作られたコンクリート構造物などの社会インフラや工場プラントなどが多く、これらの老朽化が問題となってきている。これらを安心して使用するためには、検査機器をその場に持ち込み、ものを壊さずに劣化状況を検査する非破壊検査法が必要とされている。非破壊検査法には、超音波を使うもの、電磁波を使うもの、X線・放射線を使うものなど様々な方法がある。この中でも特にX線透過法は、人体のレントゲン検査と同様に検査対象物の内部の透過イメージを得ることができ、検査結果がわかりやすいことから、様々な分野で利用されている。

しかしながら、X線透過法でプラント配管の減肉検査などを行おうとすると、材質が鋼製の配管は高いエネルギーのX線が必要で、それに対応するX線源は大きく重く、狭い箇所の検査が難しいという問題があった。また、出力の大きなものはヒーター・フィラメントの余熱の時間が長く使いたい時にすぐ使えない、エネルギー消費が大きいという欠点もあり、利便性が悪いためにX線透過検査がな

れない場合も多い。これらの問題が解決できれば、検査機会が増え、事故や故障の確率を減らすことができると考えられる。

そこで、筆者らは、乾電池のようなどこにでもある電源で駆動できて持ち運びしやすく、100 keV以上の高エネルギー高出力X線を発生できる可搬型X線発生装置の開発を目標として設定し、開発を行ってきた。その結果、カーボンナノ構造体を電子源とした乾電池駆動高エネルギーX線発生装置の開発に成功した。このX線発生装置は、単三乾電池わずか1個でも100 keV以上のX線を発生し、条件によっては100枚以上の高精細X線透過像の撮影が可能であり、可搬型X線源として実用になる。これを利用すれば、交流電源や重いバッテリー無しに、その場にX線源を持ち込んでX線透過検査が可能になることから、新しい非破壊検査用X線源として期待される。

本稿では、開発した乾電池駆動高エネルギーX線発生装置について述べるとともに、従来から行ってきた研究がいかにこの成果に結びついたかについて考察する。

産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2
Research Institute of Instrumentation Frontier, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan E-mail: r-suzuki@aist.go.jp

Original manuscript received May 15, 2009, Revisions received July 14, 2009, Accepted July 16, 2009

2 乾電池駆動可搬型高エネルギーX線源

X線は、陰極から放出された電子ビームを加速し金属ターゲットに入射することによって発生させることができる。従来のX線管は、陰極からの電子放出はフィラメントあるいはヒーターによる熱電子放出現象を利用しており、陰極の温度が一定になるまで待たなければならない、ヒーターに電力を供給しなければならずX線を発生していない時でも電力を消費する、といった問題があった。特に、可搬型のX線源では、この問題によって利便性が損なわれていた。

筆者らが開発したカーボンナノ構造体を用いたX線源^[1]は、このヒーターやフィラメントが不要で、従来のX線源と同程度以上のX線を出力することができ、予熱やエネルギー消費の問題を解決できる。

開発したX線管に用いたカーボンナノ構造体は、共同研究先の企業が開発したもので、炭素で構成されるグラフェンシートが針葉樹状の形状をしていて、先端部はナノメートルサイズの中空構造で基板側に行くほど太くなっている構造のため、機械的に安定で先端部に電界が集中しやすく、室温で100 mA/cm²以上の高い電流密度の電子放出が可能である。

開発の当初は、このカーボンナノ構造体を電子源、モリブデンメッシュを引き出し電極、金属板をターゲットとしたX線管を試作したが、この構造では、メッシュ電極が高温になり、ガスを出して異常放電しやすいという問題があっ

た。カーボンナノ構造体は、放電によってそのナノ構造が損傷し、電子の放出特性が劣化するため、異常放電が多いことは致命的な欠点である。そこで、この欠点を克服するため、加速器開発に使われているシミュレーションコードを用いて、メッシュ電極を用いず、電子ビームがターゲットに効率的に集束するような構造のX線管を設計し、試作した。このX線管は、陰極の電子源に負の高電圧、陽極のターゲットに正の高電圧を印加する双極型のX線管である(図1)。

カーボンナノ構造体を用いたX線管の製作工程では、エージングと呼ばれる放出電流の安定化処理を行うが、この段階での異常放電は電子源にダメージを与えることから、放電を起こさずに放出電流の安定化処理を行えるような処理条件を試行錯誤により探し出した。この結果、熱電子放出型のX線管にも引けをとらない高出力X線を発生できる冷陰極X線管が得られた。

このX線管は、ヒーター・フィラメントがないため、特に可搬型のX線検査の用途でその特徴を発揮できると考えられることから、図2の構成の乾電池駆動可搬型X線発生装置を完成させた。このX線発生装置は、単三乾電池1個を電源として蓄電回路に一時的に電力を蓄積し、X線発生可能な電力量が蓄積したら高電圧発生回路で高電圧を発生してX線管を駆動しX線を発生する。高電圧発生回路では±50 kV以上の電圧を発生し、100 keV以上のX線を発生できる。このX線管は、X線の発生時以外はエネルギー消費をほぼゼロにできるため、エネルギー効率が極めて高い。また、予熱が不要ですぐにX線を発生でき、可搬型のX線源として利便性が高い。さらに、電源を含めた全重量を5 kg以下にでき、持ち運びが容易である。

図3は、図2の蓄電回路から2 Jの電力量を高電圧発生回路に供給してX線管を駆動し撮影したテーブルタップの

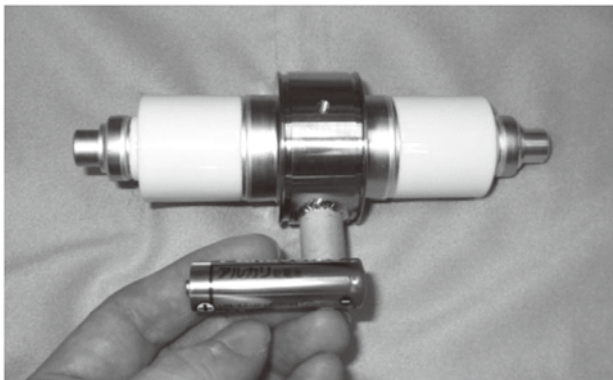


図1 カーボンナノ構造体電子源を用いたX線管。

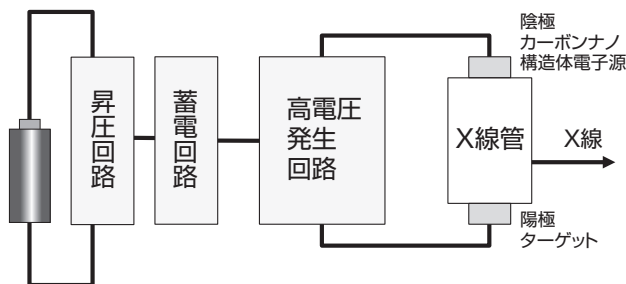


図2 乾電池駆動X線発生装置外略図。

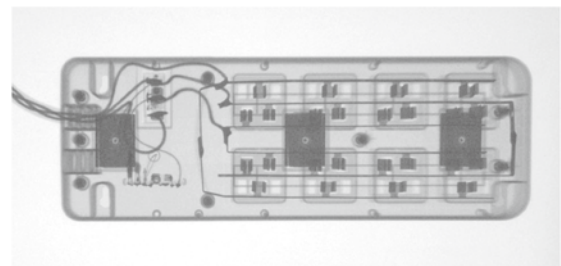


図3 (上) 被検体：テーブルタップ。(下) 乾電池駆動X線源により撮影したX線透過像。投入電力2 J。

X線透過像であり、コンセントの電極の開き具合などを認識できる。しかしながら、2 J程度では照射面積が広い場合細かい構造の部分でノイズが目立ち解像度が不十分である。

図4は、20 Jの電力量を高電圧発生回路に供給して撮影したX線透過像であり、ノートパソコン内のLSIチップなどが0.2 mm以下の解像度で撮影できる。また、直径10 cm程度のセラミック製碍子内の電極も鮮明に見える。したがって、20 J程度のエネルギーがあれば、様々な物の高精細X線透過像を撮ることができ実用的と言える。この20 Jの電力量を1ショットとしてX線透過像の撮影を行った場合、単三型ニッケル水素電池（容量：2000 mAh）1本を電源として100ショット以上（2本なら300ショット以上）の透過像撮影ができることを確認している。また、X線管の寿命は、1ショット50 Jの電力量で 10^6 ショットのX線発生を行っても劣化がみられず、可搬型のX線源としては問題無いことを確認している。

さらに、このX線管の最大放出電流は50 mA以上で、短時間に出力の高いX線を発生させることも可能である。これによって、1ミリ秒以下の短時間露光もできる。この高出力特性を利用すれば、通常のX線透過像撮影だけでなく、高出力X線が必要なコンピュータトモグラフィ（CT）撮影用のX線管としても使用できると考えられる。

X線源の技術をラジオにたとえるなら、従来のX線源は真空管式のラジオで、可搬するにしてもバッテリーを常に気にしなければならなかったが、カーボンナノ構造体を用いたX線源はトランジスタラジオに匹敵し、X線源の可搬性が飛躍的に高まる。これにより、現場でのX線非破壊検査・X線診断が容易になり、X線の検査法において新たなイノベーションが期待される。

3 成果実現までの経緯

筆者らは、これまで電子加速器の開発及び利用研究を行ってきており、2章で述べた新X線源の開発は、産総研

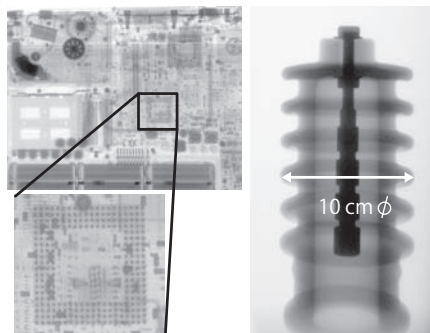


図4 投入電力20 JのX線透過像。
 (左) ノートPCのX線透過像。
 (右) テスト電極付アルミナ碍子のX線透過像。

が有する可搬型超小型加速器・X線源技術と、企業が開発したカーボンナノ構造体電子源の技術を統合することによって実現したものである。さらにこの超小型加速器・X線源の技術は、電子加速器の省エネルギー化、電子加速器の小型化などが技術のベースとなっている。以下に、新X線源開発の元となった各要素技術について述べる。

3.1 電子加速器施設の省エネルギー化

筆者らは、産総研の最大エネルギー400 MeVのSバンド電子リニアック（線形加速器）の管理・運転とそれを用いた研究を行ってきている。この加速器は、1979年に完成し、放射光電子蓄積リングTERAS、自由電子レーザー専用電子蓄積リングNIJI-IV、材料評価実験用高強度低速陽電子ビーム源などに使用されてきている^[2]。この加速器施設では、2005年度に老朽化した空調等の改修に合わせて施設全体の抜本的な省エネ化対策を実施した。

省エネ化対策前のこの施設の電子リニアック稼働時の電力は、瞬時600 kW以上、年間の電力使用量は約2.5 GWh以上であった。この電子リニアックの電子蓄積リングへの電子入射において真に必要なビーム電力を見積もってみると、 $320 \text{ (MeV)} \times 100 \text{ (mA)} \times 1 \text{ (}\mu\text{s)} \times 2 \text{ (pps)} = 64 \text{ (W)}$ と実際に加速器を稼働して消費している電力の0.01%しかない。また陽電子の実験の場合は、 $70 \text{ (MeV)} \times 100 \text{ (mA)} \times 1 \text{ (}\mu\text{s)} \times 100 \text{ (pps)} = 700 \text{ (W)}$ と実際の消費電力の数100分の1である。

この非常に低い効率にはいくつかの要因があるが、第一の要因として元来この電子リニアック及びそれに付随した施設の空調・冷温水系は様々な実験に対応するため数10 kWの大出力電子ビームの発生も可能なように設計され、それが蓄積リングへの入射のような低パルスレートのモードや陽電子の実験のような低エネルギーモードに最適化されていないことがあげられる。

この問題の解決には、電子リニアック本体部だけでなく、空調や冷温水系も含めた抜本的な対策が必要である。そこで、長年蓄積した加速器技術と空調・冷温水・電源システムの最新技術を組み合わせた省エネ化対策を練った。この省エネ化対策を実施するにあたって、以下のような省エネ化の基本原則を設定した。

- 1) エネルギーを必要な量だけ使用する
- 2) エネルギーを必要な時間だけ使用する
- 3) エネルギーを必要な場所だけ使用する
- 4) 最新のエネルギー効率の高い技術を導入する

この基本原則に基づいて改修や新規導入する機器の仕様を決めるには、いつ、どこで、どれだけエネルギー（電力）が消費されているかを把握する必要がある。そこで、各部の消費電力を調査し、改修対策に割り当てられた予算の範

圏内でできる限りの対策を実施した³⁾。

その主な対策は、冷温水・空調システムの分散化と電子リニアックの大電力マイクロ波発生装置の更新である。冷温水・空調システムは、様々な実験条件下での消費電力を見積り、検討した結果、集中型よりも分散型のシステムの方が大幅な電力消費削減を期待できることがわかったことから、実験に応じて各部の空調・冷温水系を ON/OFF できる分散型のシステムを導入した。

S バンド電子リニアックは、電子加速のための大電力マイクロ波を発生するクライストロン装置として建設当時最新の 22 MW 出力のものを 8 台使用していた。現在はその 4 倍近い出力を出すことができる 80 MW クライストロンが開発されているため、3～4 台をこれ 1 台に置きかえた。従来のクライストロンの消費電力は、低パルスレートでは安定しないために蓄積リングに供する場合でもやむなく 50 pps 以上のパルスレートで使用せざるを得ず、このために 1 台あたり約 30 kW、3 台で約 100 kW の大きな消費電力であったが、新たに導入した 80 MW クライストロンは、蓄積リングの入射により適した 2 pps で運転でき、平均の消費電力は 10 kW 以下と削減できた。この部分に限ればエネルギー消費は改修によって 1/10 になった。これによって、冷温水や空調系の能力も削減でき、大幅な省エネ化が可能になった。

このほかにも上記原則に従い様々な対策を行い、図 5 のように施設全体として改修前に比べて約 60 % の大幅な電力使用量の削減を実現した。さらにこの対策によって、電子リニアックの稼働時間も増えており、研究を効率的に行うことができるようになった。

この対策に直接かわることによって得られた省エネ化のノウハウは、超小型電子加速器・新X線源の低電力量駆動回路開発につながった。

3.2 Cバンド小型電子加速器の開発

高強度低速陽電子ビームを用いた研究は、前述の S バン

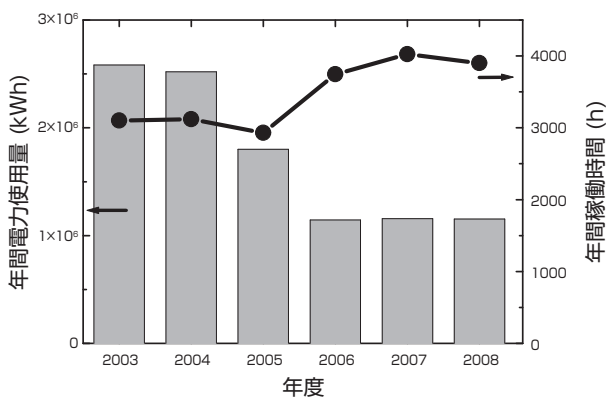


図 5 電子リニアック棟（産総研つくば中央 2-4 棟）年間電力使用量（棒グラフ）及び電子リニアック稼働時間（折れ線グラフ）。

ド電子リニアックを利用して実験を行ってきたが、この加速器は共用の加速器のために蓄積リングへの入射を行う場合に陽電子の実験を中断しなければならず、実験の時間が制限されていた。また、加速器が陽電子発生を前提として建設されたものではないため、陽電子の発生効率が悪いという問題もあった。これを解決するには専用の電子リニアックが必要で、限られた遮蔽スペース内に陽電子発生効率の良い電子リニアックを設置するには小型の電子リニアックが必要である。

さらに、陽電子ビームを用いた実験では、検出器が飽和しないようにするため、加速器のパルスレートが高い方が望ましい。そこで、陽電子発生用の電子加速器として、加速管へマイクロ波を供給してから電界が一定になるまでの時間（フィリングタイム）が短くパルスレートを高く取れる C バンド電子加速器を選定し、そのシステムのコンポーネント開発を行った（図 6）⁴⁾。この C バンド電子加速器は、共振器のサイズが小さくなることから、加速管の径や導波管のサイズも従来の S バンド電子リニアックに比べて小さく小型化できるという利点がある。

また、この加速器では、マイクロ波増幅管（クライストロン）に供給する高電圧パルスの発生回路において、高電圧大電流の半導体スイッチを用いた新しい回路の開発を行い、18 cm × 7 cm × 7 cm 程度の小型の半導体スイッチで C バンドクライストロンを駆動して約 2 MW の大電力マイクロ波を発生し、電子ビームを加速することに成功している。

これらの C バンド加速器の研究開発の過程で得られたマイクロ波の高周波化、高電圧半導体スイッチおよび高電圧パルス発生技術が新 X 線源を実現する上での技術的なベースになっている。

3.3 乾電池駆動超小型電子加速器

2000 年代に入り、原子力発電所の配管の蒸気漏れ事故や工場プラント配管の老朽化による事故が増える傾向が出てきて、これらの検査を現場で行いたいという社会的なニ

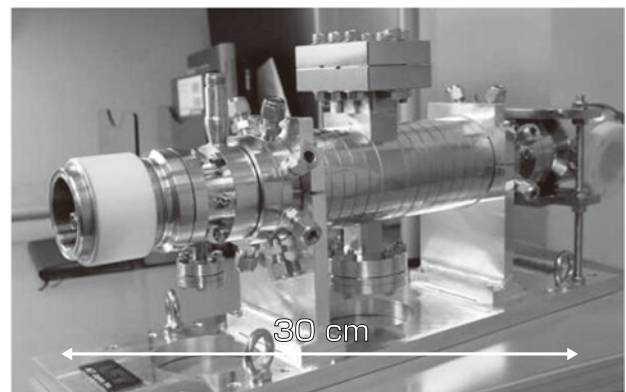


図 6 C バンド電子加速器初段部。

ズが強まってきた。特に保温材などの被覆材付配管は被覆材を剥がして検査するには非常に手間がかかり、被覆材を付けたままでの検査法が望まれていた。ちょうどその頃、筆者らは3.1節、3.2節で述べたように電子加速器の小型化・省エネ化の研究を行っていた。1章で述べたようにこの研究で得られた知見がこのニーズに応えられると考え、小型化・省エネ化を極限まで追求した電子加速器・X線源システムについての概念設計を行った。ここでは、効率的な高電圧パルス発生技術、マイクロ波発生技術、電子発生技術、制御系など従来の加速器の技術を1つ1つ原点に立ち返って設計した。その結果得られた詳細な見通しに基づいて、開発・試作を行い、超小型電子加速器を単三乾電池で駆動し高エネルギーX線を発生させることに成功した。

この超小型電子加速器の基本構成は大型の電子加速器と同じく電子銃、加速管、マイクロ波源、真空ポンプ、真空排気装置電源、パルス発生装置、制御システムなどで構成される。従来の加速器では加速管が多数あるので、加速管間の共振周波数を合わせるためそれぞれの温度制御に冷温水が必要だったが、この新たな加速器は加速管が1つで、乾電池で駆動する場合は熱負荷も少なく冷却の必要も無い。そこで、この加速器では、加速管の温度を制御して共振周波数を一定にする方式ではなく、周波数を変化させて共振周波数に合わせる方式として従来の加速器で大きな電力消費の原因だった冷温水系が無いシステムとしている。また、真空ポンプは高真空下では電力消費がほとんど無いイオンポンプを使用している。

この加速器では、マイクロ波源として前述のCバンドよりもさらに周波数の高い9.4 GHzのXバンドパルスマグネトロン管を用いている。このマグネトロン及び電子加速器の電子銃を駆動するために、電池電源を12 kV以上に昇圧して蓄電回路に電力エネルギーを蓄積し、半導体スイッチにより約100 kWの高電圧パルスを約1マイクロ秒の幅で発生し供給する。この高電圧パルスによってマグネトロン管で発生した9.4 GHzのマイクロ波を加速管に供給することにより、電子ビームを加速し、100 keV以上の高エネルギー電子ビームを発生する。この電子ビームを重金属ターゲットに入射することで、X線が発生する。

図7は、電子銃、加速管、真空ポンプ（イオンポンプ）、X線ターゲット（金薄膜）、X線射出窓で構成される加速管本体部の試作機の写真で、大きさはほぼ手のひらサイズ（うち加速管は約3 cm）、重量約1.5 kgである。この図中のフランジやバルブは試作段階でのみ必要なものであり、これらを除けばその重量は半分以下になる。この本体部とマイクロ波源や電源等のコンポーネントを小型のカメラ

ケースに収めて片手で容易に持ち運びできるようにしている。

この超小型加速器は、ピーク電力は100 kWオーダーであるが、その幅は1マイクロ秒であるため、パルスレートを低くすることによって平均消費電力を20 W以下にでき、単三乾電池10～12本でX線を発生できる。このX線源にX線イメージングシステムを組み合わせることにより、X線透過イメージングが可能である^{[5][6]}。このシステムを完成させるために、乾電池から高電圧大電力パルスを発生する技術を試行錯誤しながら作り上げた。これが、次に述べるカーボンナノ構造体の電子放出特性の試験やX線発生装置にも応用でき、短期間での開発に繋がった。

3.4 カーボンナノ構造体電子源のX線源への応用

前述の超小型電子加速器の電子源は、熱電子放出の原理を用いているためにX線を発生する瞬間以外の時間もヒーター電源を入れておかなければならず、単三乾電池10本程度では4時間程度しか持たない。そのため、乾電池は非常用電源の性格が強く、真にいつでもどこでも使えるX線源とは言えなかった。この熱電子放出電子源の問題は、高周波電子加速方式に限らず一般的な可搬型X線源でも同様である。

ヒーターやフィラメントを使わない高性能電子源があればこの問題を解決できるが、室温で電子放出を起こすカーボンナノチューブ（CNT）には、X線管のように強い電界をかけると構造が壊れすぐに劣化するという欠点があった^[7]。そこで、CNTよりも高電界下での安定性が高い冷陰極電子源を探し、ある企業が開発したカーボンナノ構造体（CNX）電子源に注目した。この電子源は、形が針葉樹状で基板側に行くほど太くなっている構造を持ち、先端部はCNTと同じナノメートル構造で先端部に電界が集中しやすくなっており、高電界下でもCNTより安定していると考えられることから、X線源として有望であると予想された。

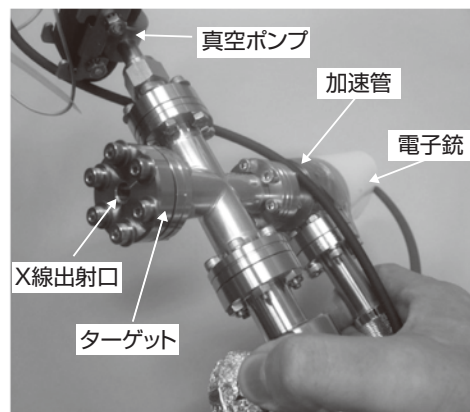


図7 Xバンド超小型電子加速器本体部。

そこで、CNX 電子源を用いた予備実験により動作を確認した上で 2008 年 7 月から製品開発に着手した。この CNX 電子源の他にカーボン系の冷陰極電子源なども市販されていたが、それを使わずに CNX 電子源を選択したのは、企業側が電子源の製造装置を当所に持ち込み、X 線源の開発においていくらかでも試行錯誤ができる環境ができたからである。これによって、様々な条件の実験が可能になり、2 章に示した新 X 線発生装置の最終的な実現に至った。

4 考察

ここでは、今回の乾電池駆動高エネルギー X 線発生装置の開発を通じて得られた知見、考察を記す。

カーボンナノ構造体を用いた乾電池駆動高エネルギー X 線発生装置の開発は、これまで述べてきたように、産総研で行ってきた電子加速器の省エネ化、小型化の研究とそれを応用した乾電池駆動超小型電子加速器の技術がベースとなって、それに企業の有するカーボンナノ構造体電子源の技術が統合することによって実現したものである。

電子加速器の小型化の研究では、元々大型の電子加速器を保有し利用していて、その問題点を解決したいという研究上のニーズが研究を開始した動機である。この動機に対して、省エネルギー化で小型化された加速器は非破壊検査・医療・滅菌など産業上も応用範囲が広いと考えられることから新たな開発課題として設定され、小型の C バンド加速器のためのコンポーネント開発に着手できたことがその後の加速器省エネ化や超小型電子加速器の開発につながっている。また、C バンド小型電子加速器・X バンド超小型電子加速器の開発では、従来の S バンド電子加速器や放射線検出技術などの技術・人材や放射線管理区域などの施設のリソースが大いに役立った。つまり、大型の電子加速器施設がなければ今回のような成果に至らなかったかもしれない。

加速器の省エネ化については、老朽化した空調・冷温水の改修という機会に巡り会えたことで、省エネ化を机上の空論とせず、様々な省エネ化対策を実施することができた。この対策の中には、通常の電子加速器システムでは採用しないような、試験的な対策も含まれており、それらの効果を把握することで電子加速器の省エネ化技術・ノウハウを蓄積できたことが大きい。

X バンド超小型電子加速器の開発は、可搬型の高エネルギー X 線源の社会的なニーズと産総研の電子加速器の小型化・省エネ化のシーズが結びついた。この加速器は、熱電子放出のためにヒーターがあり、真に実用的な可搬型 X 線源とは言えなかったが、この成果を外部に発表して我々の技術レベルを示すことができたことで、カーボンナノ構

造体電子源という新たな技術に巡り会うことができた。さらに、企業側もこの開発に熱意を持って取り組み、企業の電子源の製造装置を当所に持ち込み、集中的な研究の中で試行錯誤を繰り返すことにより、わずか半年という短期間で真に実用的な X 線発生装置を開発できた。

このように、今回の成果は、個々の技術に加えて、研究施設、人、研究環境の変化、技術の蓄積、社会ニーズ、成果発表などの様々な要素が統合した成果と言える。ただし、それぞれの要素は、単なる寄せ集めでは新たな成果には結びつかない。たとえば、何の問題も無く電子リニアックが稼働していたなら、省エネ化・小型化できる手法やカーボンナノ構造体の電子源があっても積極的に採用しようとは思わず、その後の開発に繋がらなかったであろう。それぞれの要素技術が不完全なあるいは問題点を積極的に見つけるほうが、その問題を他の要素技術ととりいれながら 1 つ 1 つ解決していくことにより、他の要素技術との繋がりが強固になり、新たな成果に結びつくと考えられる。

5 まとめと今後の課題

本稿では、単三乾電池 1 個で動作し、高精細 X 線透過イメージを撮ることができる X 線源の開発がどのような要素技術が結びついて実現したかについて論じた。開発した X 線源は、X 線源単体として従来の X 線源を置きかえることができるだけでなく、予熱不要でどこにでも持っていくことができるという特徴があり、これまでに無い新たな X 線非破壊検査への展開も期待される。その場合、X 線源だけでなく、検出器や安全装置などトータルなシステムとして完成させる必要がある。また、大型の構造物の検査にも対応できるようにするため高周波加速方式によるエネルギー増強も必要である。

今後、これらの課題に取り組み、X 線検査の分野に真のイノベーションを起こすよう研究を続けていきたい。

謝辞

本研究のカーボンナノ構造体を用いた X 線源開発は、2008 年度産業技術研究開発事業（中小企業支援型）においてダイライトジャパン株式会社及び株式会社ライフ技術研究所との共同研究により実施されたものである。C バンド電子加速器開発の一部は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省原子力試験研究費により実施されたものである。本研究は産総研電子加速器グループの協力をいただいた。電子加速器の省エネ化改修では産総研研究環境整備部門及び監視盤室の協力をいただいた。カーボンナノ構造体の企業に関して産総研一村信吾理事よりご紹介いただいた。ここに関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2009/pr20090319/pr20090319.html
- [2] *TELL-TERAS Activity Report 1987-1990*, Electrotechnical Laboratory, Japan (1990).
- [3] R. Suzuki, K. Yamada, M. Koike, S. Ichimura, N. Sei, H. Toyokawa, H. Ogawa, M. Yasumoto, R. Kuroda, T. Ohdaira, A. Kinomura and N. Oshima: 50 % Reduction of energy consumption in AIST electron accelerator facility, *Proc. 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, 242-244 (2006).
- [4] R. Suzuki: Generation of slow positron beam by an electron LINAC and its applications, *Proc. 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, 82-86 (2005).
- [5] 鈴木良一：乾電池で動作する超小型電子加速器, *検査技術*, 13 (6), 5 (2008).
- [6] http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2007/pr20071022/pr20071022.html
- [7] 奥山文雄：カーボンナノチューブを電子源とするX線管, *日本放射線技術学会雑誌*, 58 (3), 309-313 (2002).

執筆者略歴

鈴木 良一 (すずき りょういち)

1987年筑波大学大学院工学研究科博士課程前期修了、1991年博士(工学)取得。1987年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所入所。2001年産業技術総合研究所主任研究員。電子加速器技術と電子加速器を用いた高エネルギーX線発生・計測や高強度低速陽電子ビームを用いた材料評価技術の開発・応用に関する研究に従事。2004年電気科学技術奨励賞(オーム技術賞)、2005年市村学術賞(財)新技術開発財団)。



査読者との議論

議論1 電子加速器小型化での独自の技術開発について

質問・コメント(一條 久夫:産総研評価部)

電子加速器の小型化の記述では、独自の技術開発であることが分かり難いように思います。著者自身の論文、特許などを引用しつつ、独自性ある研究結果が導かれたことを記される方が良いのではないのでしょうか。

回答(鈴木 良一)

電子加速器システムでは、加速周波数を上げれば小型化ができることは公知の事実であり、それ自体に独自性はありませんが、陽電子の発生用に小型電子加速器の開発を始めたのは我々が最初ですので、それを報告した学会発表の論文を引用しました。また、この成果は本論文の主題ではないため、研究の経緯の章に入れました。

議論2 乾電池駆動超小型電子加速器の概念設計での取り組みについて

質問・コメント(一條 久夫)

乾電池駆動超小型電子加速器の開発に関する記述に、概念設計と記されていますが、すでに経験した省エネ化を今回の概念設計に如何に活かしたのかを、技術的側面を中心に書き込まれてははいかがでしょうか。

回答(鈴木 良一)

詳しい内容は知財に登録しているため書くことはできませんが、概念設計において、どのような技術に取り組んだかについて文章を加えました。

議論3 非破壊検査への適用可能性や課題について

質問・コメント(一條 久夫)

原稿では最後のパラグラフで、著者自身の創意・工夫が記されると、独自性が明確になるように思います。また、ここで非破壊検査への適用可能性や課題についても記されては如何でしょうか。

回答(鈴木 良一)

図と文章の言葉を統一しました。超小型加速器の冷温水系が無いシステムについての説明を加えました。このパラグラフと次のパラグラフで、超小型加速器の課題とカーボンナノ構造体 X 線源開発にいかにか繋がったかについて書き込みました。

議論4 本研究の構成要素について

質問・コメント(田中 充:産総研研究コーディネータ)

省エネ化、小型化、電子源の導入が本研究の構成要素と考えられます。それらを支える広範な技術が加速器施設を用いた研究のバックグラウンドの上に培われていたところへ、省エネ化・小型化を図らねばならないとの強い要請への対応の実験がその実用化に拍車を掛けたこと、高性能の電子源に関する外部機関の重要な技術導入も同様に拍車を掛けるのに役だったことが、本格研究の構成学と思います。

回答(鈴木 良一)

そのとおりと考え、読みやすいように本論文の並び換えをしました。

議論5 カーボンナノ構造体のX線源用電子源としての有効性について

質問・コメント(一條 久夫)

原稿では、カーボンナノ構造体電子源・X線源について、X線源用の電子源として有望・とのみ記されていますが、数値も交え、どう有効なのかを記されると理解が深まるように思います。また、技術的課題を解決するために検討された種々の方法、カーボンナノ構造体電子源を組み入れることにより期待される効果などを勘案した上、この技術統合に至ったプロセスを簡単に記されると、要素技術の選択・統合が明確になるのではないのでしょうか。

回答(鈴木 良一)

田中査読委員の意見も踏まえ、このパラグラフが論文の主題ですので、これを章としてまとめ、これまでの経緯の前にもってきました。それに伴って、数値も交えて実験結果等を入れ、詳しく説明するようにしました。カーボンナノ構造体の技術の統合については、経緯のほうにも少し説明を加えました。