

## PRESENT STATUS OF THE AIST ACCELERATOR FACILITY

Hiroyuki Toyokawa<sup>#</sup>, Nagayasu Oshima, Brian O'Rourke, Masahito Tanaka, Norihiro Sei, Hiroshi Ogawa, Ryunosuke Kuroda, Atsushi Kinomura, Toshiyuki Ohdaira, Masato Yasumoto, Hiromi Ikeura, Eriko Yamaguchi, Masafumi Kumaki, Tatsuya Zama, Norio Saito, Masaki Koike, Ryouichi Suzuki, Kawakatsu Yamada  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)  
1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568 Japan

### Abstract

Present status of the electron accelerator facility of National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) is overviewed. The accelerator complex consists of two linear accelerators and two storage rings, which are used for research facilities of slow positrons, laser Compton X- and gamma-rays, free-electron lasers, polarizing undulator radiation, and synchrotron radiation for measurement standardization. The research field extended to material science, biotechnology, medicine, nuclear physics, nondestructive inspection and photometry standard.

## 産総研電子加速器施設の現状

### 1. はじめに

産業技術総合研究所（産総研）の電子加速器施設では、1980年に電子リニアック TELL が、1981年に蓄積リング TERAS が稼働を開始し、その後小型の蓄積リング(NIJI-I~IV)が企業との連携により開発された。最近では2005年に40 MeVのSバンド小型リニアックも導入され、これらの加速器群をベースに特徴的な量子ビーム源の開発とその利用研究を進めている。ここでは産総研電子加速器施設の最近の稼働状況と研究成果の概要について述べる。

### 2. 施設の概要

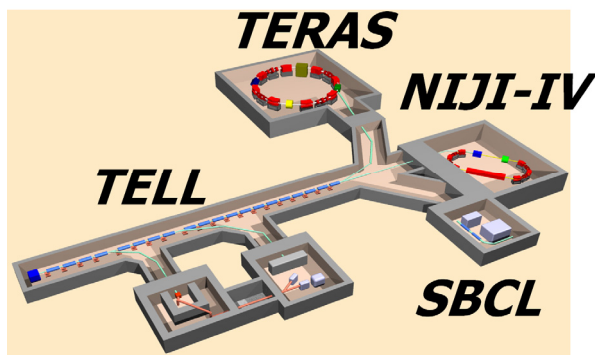


図1：産総研電子加速器施設。

図1に加速器施設の鳥瞰図を示す。最大エネルギー400 MeVのリニアック TELL は蓄積リングへの電子入射器であると同時に、その低エネルギー部（約75 MeV）で、低速陽電子ビームの発生と利用研究が行われている。蓄積リング TERAS は通常、エネルギー750 MeVで運転を行い、真空紫外から軟X線の放射光を用いた材料分析や、高精度光標準技術開発と供給に利用される一方、レーザーコンプト

ン散乱 $\gamma$ 線(LCS- $\gamma$ 線)や高速スイッチング偏光変調アンジュレータ光等、世界的にも稀少な量子ビームの発生とそれらの利用研究に利用されている。自由電子レーザー(FEL)専用の NIJI-IV は340 MeVのレーストラック型蓄積リングで、真空紫外から赤外までのFEL発振、およびレーザー共振器内で起こるLCSによって、単色硬X線の発生が可能である。40 MeVのSバンド小型リニアック(SBCL)は、NEDOプロジェクト「フェムト秒テクノロジーの研究開発(2004年度終了)」の中で開発された後、当所に移管されたもので、医用イメージングを目的とした高輝度準単色LCS硬X線の発生、および高強度のテラヘルツ波発生に利用されている。

産総研電子加速器施設では、ここ数年、電力消費効率の向上に努めており、最近になってその成果が表れてきた。成果の一例として、2009年度におけるリニアック TELL の用途別稼働時間の月毎の推移を図2に、また2003年~2011年度における加速器施設の年間電力使用量を図3に示す。2005~2006年度に実施した加速器施設の空調機の分散化、クライストロン電源と加速器温調系の省エネ化改造等によって、電力使用量を2003年度に対して半分程度まで減少させることに成功している。

### 3. 最近の研究成果

産総研電子加速器施設では電子ビーム源を用いて特徴的な量子ビームを発生させるとともに、これらを用いた独自の計測手法を開発し、材料開発、バイオ・医療、非破壊検査など、幅広い産業分野に貢献している。これらの成果の一部を以下で紹介する。

#### 3.1 リニアック TELL における成果

TELLには、前段部の75 MeVの電子ビームを用いて陽電子ビームを発生するビームラインがある。ターゲットはタンタルであり、減速材、陽電子DC化装置、再パルス化装置を経て150 ps程度の低速陽電子ビームを発生させる。収量が約 $10^8 \text{ s}^{-1}$ と非常に

高く、各種材料に照射して陽電子寿命を測定することにより、材料内部の原子～ナノメートルサイズの空孔評価が可能である。最近では、独自に考案した集束技術を用いて  $30\ \mu\text{m}$  以下に絞った陽電子マイクロビームを走査し、材料内の欠陥分布の 3 次元イメージングも可能になっている<sup>[1]</sup>。

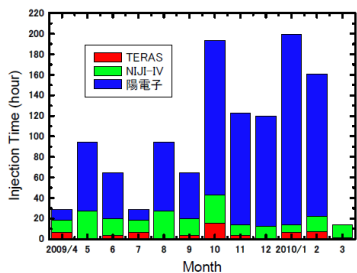


図 2 : TELL の用途別稼働時間。

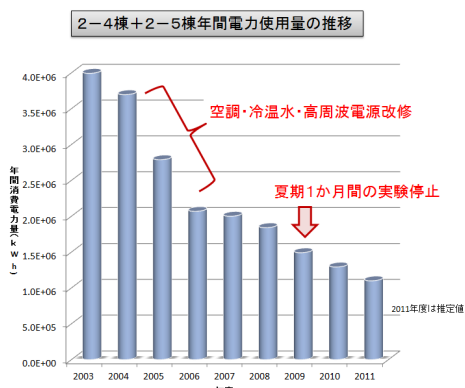


図 3 : 電力量の推移。

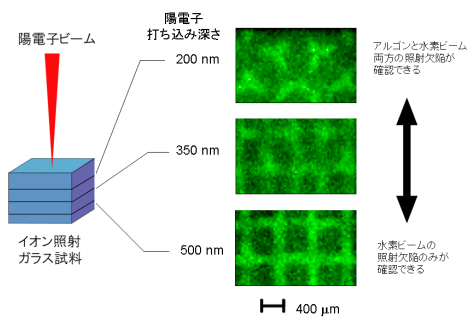


図 4 : イオン照射誘起欠陥の 3 次元分布。

図 4 は石英ガラスに異なる角度でメッシュマスクをしながら水素イオンとアルゴンイオンを照射した時の、異なる深さでの陽電子寿命画像である。水素イオンがより深くまで侵入して欠陥を発生させる様子が 3 次的に観測できる。計測のスループット向上を目指して陽電子計測専用の超伝導加速器の開発も進めつつある<sup>[2]</sup>。

### 3.2 蓄積リング TERAS における成果

TERAS はエネルギー  $300\sim 800\ \text{MeV}$  の第二世代放射光源であり、真空紫外域での分光放射輝度標準、軟 X 線域でのフルエンス標準技術開発や供給、光電子顕微鏡による表面分析などに利用されている。また、レーザーコンプトン散乱準単色  $\gamma$  線や高速スイッチング偏光アンジュレータ光等、独自に開発した光源を用いて、先端的な計測に関する研究を行っている。

図 5 は、当所で開発した極低温カロリメータを放射光ビームラインに導入した X 線強度の精密測定例で、単色 X 線 ( $0.1\sim 4\ \text{keV}$ ) の強度を  $0.2\%$  の高精度で決定できる。これを用いて軟 X 線フルエンス標準の供給、フォトダイオードの校正、W 値の測定および X 線自由電子レーザーの強度測定も試みている<sup>[3, 4]</sup>。  $40\ \text{keV}$  まで測定できる検出器の開発も行っている。紫外・真空紫外域では、光源の分光放射輝度標準校正に利用される比較校正装置の開発及び評価のため、光学系の分光波長幅の有限性に起因する不確かさ評価と最適化により、不確かさの改善に成功している ( $< 3.6\%$ )。

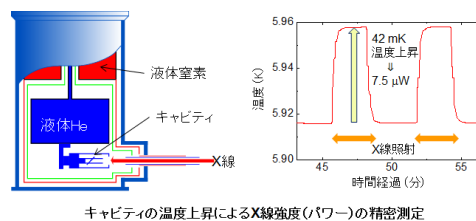


図 5 : キャビティ温度上昇による X 線強度の精密測定。

TERAS では、レーザーコンプトン散乱によって  $1\sim 40\ \text{MeV}$  の準単色 LCS- $\gamma$  線を発生させ、基礎科学から産業利用まで幅広い分野でユーザーに供給している<sup>[5]</sup>。最近では、 $\gamma$  線ビームをサンプルに照射し、内部で電子-陽電子対生成反応を誘起させ、その陽電子を用いて物性測定を行う、光子誘起陽電子消滅法と呼ばれる手法の研究を行っている (図 6)。また原子核共鳴蛍光 (NRF) を用いて、核物質や爆発物などを検査する研究も行っている (図 7)<sup>[6]</sup>。

TERAS には最大  $5\ \text{Hz}$  で偏光をスイッチングできるアンジュレータ<sup>[7]</sup>が挿入され、キラリティーを有する分子の円二色性 (CD) スペクトルを  $250\sim 40\ \text{nm}$  の波長域で高感度に測定できる<sup>[8]</sup>。このシステムを用いてキラリティーを有する 19 種の生体アミノ酸の内、現在 13 種の CD スペクトルが取得できている。図 8 に偏光アンジュレータを用いて  $40\ \text{nm}$  の短波長まで測定に成功した、L-アラニンの真空紫外分光スペクトルを示す。円二色光を用いると、明確な構造が見える。今後、糖や糖鎖などより複雑な分子も含めて CD スペクトルをデータベース化し、生体高分子の簡易な立体構造解析手法としての確立を目指している。

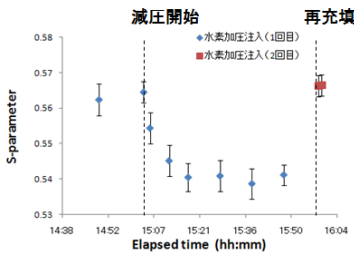


図 6 : 光子誘起陽電子消滅法によって測定した、水素吸蔵合金への吸蔵による、陽電子消滅ガンマ線幅 (S パラメータ) の変化。

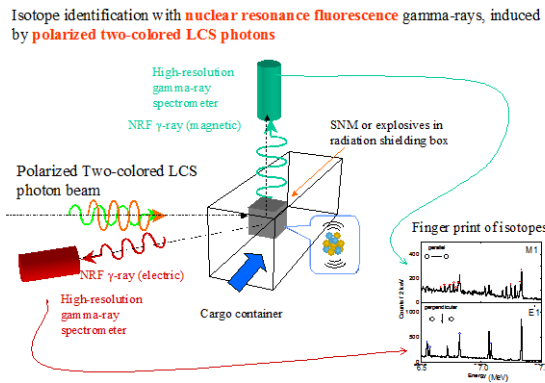


図 7 : NRF を用いた同位体の非破壊測定。

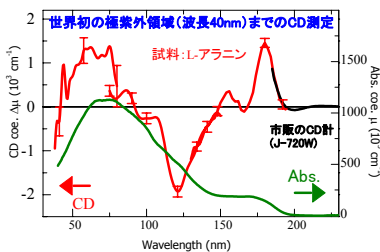


図 8 : L-アラニンの真空紫外分光スペクトル。

### 3.3 蓄積リング NIJ-IV における成果

NIJ-IV は FEL 専用のレーストラック型蓄積リングで、通常 310~340 MeV で運転され、198 nm の真空紫外から 2.7 μm の赤外域までの FEL 発振とレーザー共振器内で起こる LCS 準単色硬 X 線 (0.7~2.1 MeV) の発生が可能である<sup>[9, 10]</sup>。図 9 に最近発振に成功した赤外域での FEL 発振スペクトルを、また図 10 には赤外 FEL 共振器内で発生した FEL と電子バンチのレーザーコンプトン散乱によって発生した X 線のエネルギースペクトルを示す。広帯域の FEL の特徴を生かして、金属、半導体、ポリマー等の材料表面の化学状態イメージングや、硬 X 線を用いた非破壊イメージング等への利用研究も試みられている。

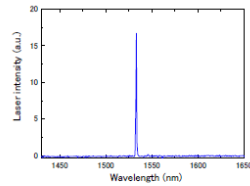


図 9 : 赤外 FEL スペクトル

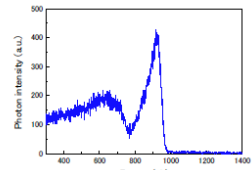


図 10 : LCS-X線 スペクトル

### 3.4 S バンド小型リニアックにおける成果

S バンド小型リニアックは、レーザーフォトカソード RF 電子銃を有し、最大エネルギー 40 MeV の低エミッタンス短バンチ電子ビームを発生する加速器である。主な用途はレーザーコンプトン X 線 (LCS-硬 X 線) とテラヘルツ光の発生と利用である<sup>[11, 12]</sup>。装置の模式図を図 11 に示す。

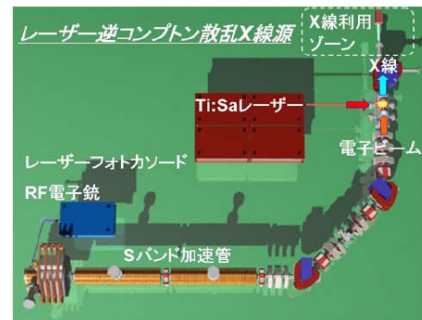


図 11 : S バンド小型リニアック。

LCS-硬 X 線の発生は、40 μm 程度に集束した電子ビームに、最大 1.5 TW の高出力フェムト秒 Ti:Sa レーザー (10 Hz) を集光照射することによって行。通常は単バンチ電子ビームに単パルスレーザー光を照射し、10~40 keV の LCS-硬 X 線を 10<sup>7</sup> photons/s (全エネルギー) の強度で発生する。現在、電子ビームとレーザーを 100 パルス化することにより、X 線収量の二桁増強を目指した改造を進めつつある。

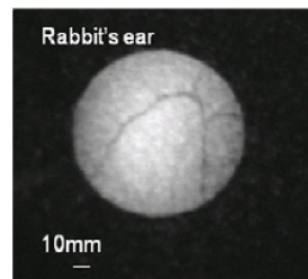


図 12 : 家兎の耳のラジオグラフィ (動画の一コマ)。

LCS-硬X線の持つ単色性を利用した、吸収端コントラストイメージングの例を図 12 に示す。サンプルはヨウ素造影剤を注入した家兎の耳で、検出器としてX線イメージンシファイア付超高感度HARP カメラを動画モードで動作させることにより、 $480\mu\text{m}$  の血管が観測できた。イメージングプレートを検出器として用いた静止画モードでは、 $80\mu\text{m}$  程度まで分解能が向上した。

また磁器パルス圧縮でバンチをフェムト秒に圧縮し、ピーク出力 10 kW のコヒーレント放射を発生している。本装置を用いた走査型透過テラヘルツイメージングの例を図 13 に示す。植物の水分布の経時変化が可視化できている。現在はテラヘルツ時間領域分光装置の開発を行っており、従来の微弱光源では測定が難しかった様々な材料分析が期待できる。

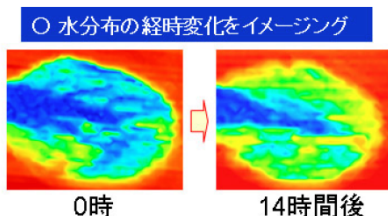


図 13 : テラヘルツ透過イメージング像。

### 3.5 カーボンナノ構造体を用いた超小型 X 線源

針葉樹型カーボンナノ構造体 (CNX) 冷陰極電子源とそれを利用した小型X線源の研究を行っている<sup>[13]</sup>。針葉樹型のカーボンナノ構造体 (図 14) は、先端がナノメートルの針を持ち基板側が太くなっていて先端部に電界が集中しやすく機械的にも安定である。そのため、従来のカーボンナノチューブ電子源で問題となっていたクーロン力やジュール熱による損傷を抑えることができる。CNX カソードでは、室温で  $100\text{ mA/cm}^2$  以上の高い電流密度の電子放出が可能であり、加速器や X 線発生用の電子源として利用できると考えられる。図 15 は、このカーボンナノ構造体を用いた乾電池駆動X線源により撮影したX線透過像で、高出力特性を利用しミリ秒オーダーの露光時間で撮影が可能である。

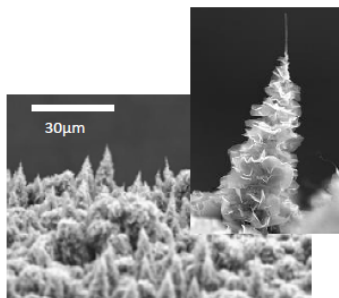


図 14 : 針葉樹型カーボンナノ構造体の電子顕微鏡像。

## 4. まとめ

産総研電子加速器施設は、先端計測のためのテストベンチとして運営してきた。今後は、より効率的に産業界に貢献するため、施設の再構築を行う予定であり、現在、超伝導加速器の建設を主として進めている。



図 15 : 電極付き碍子 (外径 10cm) (左) とその X 線透過像 (右)

## 参考文献

- [1] N. Oshima et al., Appl. Phys. Lett. 94, 194104 (2009).
- [2] B. E. O'Rourke et al., J. Phys. Conf. Ser. 262, 012043 (2011).
- [3] M. Kato et al., AIP Conf. Proc. 879, 1129 (2007).
- [4] M. Kato, N. Saito, et al., Metrologia 47, 518-521 (2010).
- [5] H. Toyokawa et al.: Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A608, S41 (2009).
- [6] N. Kikuzawa et al., Appl. Phys. Express 2, 036502 (2009).
- [7] K. Yagi-Watanabe et al., Rev. Sci. Instrum. 78, 123106 (2007).
- [8] M. Tanaka, et al., J. Phys. Chem. A114, 11928 (2010).
- [9] K. Yamada et al., Nucl. Inst. and Meth. A528, 268 (2004).
- [10] N. Sei et al., Opt. Lett. 34, 1843 (2009).
- [11] R. Kuroda et al., Nucl. Inst. and Meth. A608, S28 (2009).
- [12] R. Kuroda et al., Nucl. Inst. and Meth. A637, S30 (2011).
- [13] 鈴木良一他：産総研プレスリリース「カーボンナノ構造体を利用した可搬型X線源を開発」2009年3月19日発表。