

## PRESENT STATUS OF THE AIST ACCELERATOR FACILITY

Kawakatsu Yamada, Masaki Koike, Ryouichi Suzuki, Toshiyuki Ohdaira, Atsushi Kinomura, Norihiro Sei, Hiroyuki Toyokawa, Masato Yasumoto, Hiroshi Ogawa, Nagayasu Oshima, Ryunosuke Kuroda, Brian O'Rourke, Kazutoshi Watanabe, Hiromi Ikeura, Masahito Tanaka, Tatsuya Zama, Norio Saito, Terubumi Saito

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)  
1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568 Japan

### Abstract

At the AIST accelerator facility, quantum beam sources having outstanding features, for example, slow positrons, laser-Compton X/gamma-rays, free-electron lasers, polarizing undulator radiation, as well as synchrotron radiation, are being developed based on electron linacs and storage rings. Some of these are supplied to users in various scientific and/or technological application fields, such as material science, biotechnology, medicine, nuclear physics, non-destructive inspection and photometry standard. Here we report recent status of facility operation and some typical results of beam- application experiment.

## 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40MeVのSバンド小型リニアックも導入され、放射光はもとより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に加速器施設の鳥瞰図を示す。最大エネルギー400MeV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750MeV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も供されている。小型蓄積リングNIJIは、一部が他機関に移設あるいは譲渡され、現在自由電子レーザー(FEL)専用のNIJI-IVのみが運転されている。NIJI-IVは340MeV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発振とレーザー共振器内で起こるLCS単色硬X線の発生が可能となっている。40MeVのSバンド小型リニアックは、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



図1：産総研電子加速器施設

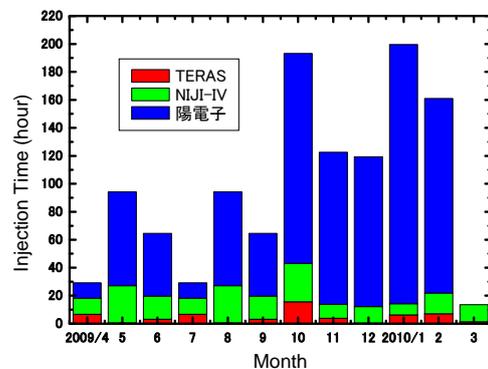


図2：2009年度におけるリニアックTELLの用途別稼働時間の月毎の推移

されたもので、LCS硬X線の高収量発生とその医療応用研究と並行して、リニアックビームの短パルス・高輝度性を生かしたコヒーレントテラヘルツ波の発生にも用いられている。

加速器施設の稼働状況の一例として、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～2009年度における加速器施設（TETASを除く）の年間稼働時間と年間電力使用量を図3に示す。年間稼働時間は2005年度以降、Sバンド小型リニアックの導入と陽電子施設の利用時間の増加によって、4,000時間/年程度に増えたが、2009年度は、年度当初に陽電子施設の利用が少なかったことに加え、省エネ・環境対応のための、夏季における施設全体の計画シャットダウン（8月中旬～9月中旬）、年度末（3月）における装置改造のための陽電子施設の停止等の結果、2005年度レベルに減少した。また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。

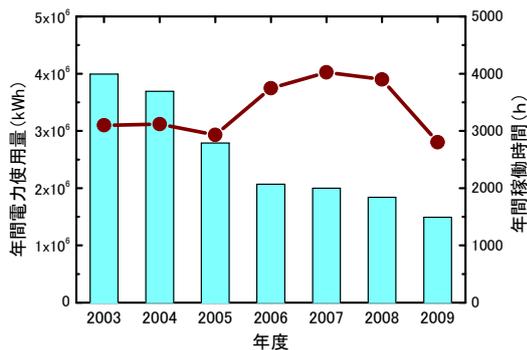


図3：リニアックの年間稼働時間と年間電力使用量の推移

### 3. 最近の研究成果

産総研電子加速器施設ではリニアック、蓄積リングの他、コンパクト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、基礎科学はもとより材料開発、バイオ・医療、非破壊検査など、幅広い分野での貢献を目指した研究を行っている。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の低エネルギー部では、70MeV前後に加速した電子ビームをTaコンバータに照射して陽電子ビームを発生し、減速材、陽電子DC化装置、再パルス化装置を経て150ps程度の低速陽電子パルスを

高収量（ $\sim 10^8 e+/s$ ）で発生させ、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 $30 \mu m$ 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。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。

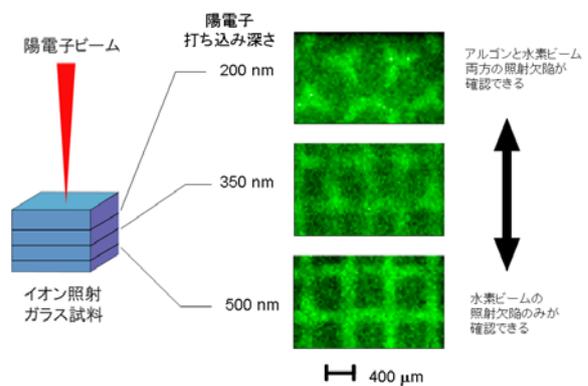


図4：イオン照射誘起欠陥の3次元分布

#### 3.2 蓄積リングTERASにおける成果

TERASはエネルギー300～800MeVの第二世代放射光源であり、エネルギーや輝度は低い、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、PEEMを組合わせた表面分析用光源等として利用されている。また、レーザーコンプトン散乱準単色γ線や高速スイッチング偏光アンジュレータ光等世界的にも稀少な光源を有し、これらを用いて独自の先端計測を行うことができる。

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(0.1-4keV)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>[1,2]</sup>。40 keVまで測定できる検出器の開発も行っている。

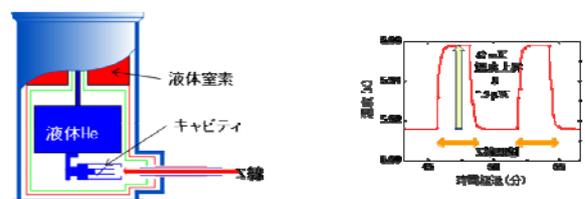


図5：キャビティ温度上昇によるX線強度の精密測定

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%)。

TERASの蓄積電子ビームにNd:YLF、Nd:YVO<sub>4</sub>レーザーやその高次高調波を外部から照射することにより1-40MeVの準単色LCS-γ線をCW的に発生でき、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。最近では、γ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。この手法を用いて、鉄筋コンクリートの非破壊検査や物質への水素吸蔵等の観測に成功した(図6)。また、原子力機構、京都大学、および民間企業と産学官連携体制を構築し、homeland securityに役立つ技術についての研究も行っている。LCS-γ線照射によって原子核から放出される、原子核共鳴蛍光(NRF)を用いて、核物質<sup>[3]</sup>や爆発物<sup>[4]</sup>などの危険物を容器に封入したまま検査する非破壊検査手法を最近開発した。図7は、厚さ1.5 cmの鉄製容器に封入した核物質の模擬試料(鉛208)の空間分布を測定した結果である<sup>[3]</sup>。NRFを用いると水素以外のほとんどの同位体を検出でき、その空間分布を可視化することも可能であることを証明した。

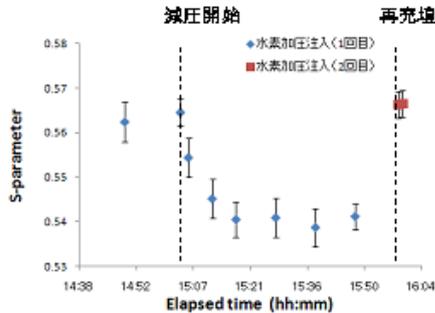


図6：合金への水素吸蔵と陽電子(Sパラメータ)の関係

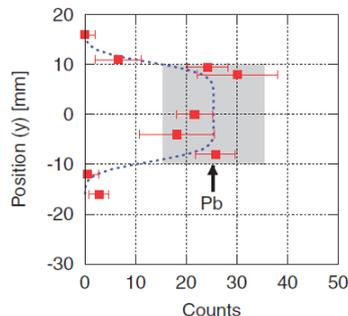


図7：鉛208のNRFγ線による非破壊イメージング

TERASには最大5Hzで偏光をスイッチングできるアンジュレータ<sup>[5]</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250~40nmの波長域で高感度に測定できる<sup>[6]</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の写真と、アラニン、バリン、ロイシンのスペクトルを示す。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。

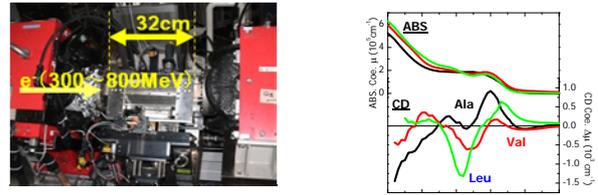


図8：偏光アンジュレータの写真とアミノ酸のCDスペクトル

### 3.3 蓄積リングNIJI-IVにおける成果

NIJI-IVはFEL専用のレーストラック型蓄積リングで、通常310~340MeVで運転され、198nmの真空紫外から2.6μmの赤外域までのFEL発振<sup>[7,8]</sup>とレーザー共振器内で起こるLCS準単色硬X線(0.7~2.1MeV)の発生が可能である。図9に最近発振に成功した赤外域でのFEL発振スペクトルの、また図10には赤外FEL共振器内で発生したLCS-硬X線のスペクトルの一例を示す。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。

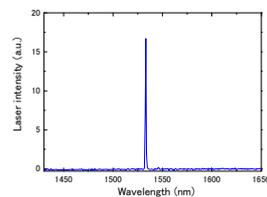


図9：赤外FELスペクトル

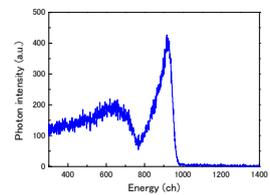


図10：LCS-X線スペクトル

### 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40MeVの低エミッタンス短バンチ電子ビームを発生する。40μm程度に集束したビームに高出力フェムト秒Ti:Saレーザーを集光することにより10~40keVのLCS-硬X線が得られる。通常は単バンチ電子ビームに単パルスレーザー光をほぼ正面から10ppsで照射し、10<sup>7</sup>photons/s(全エネルギー)のX線光子を得ている。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11に装置の模式図を、図12に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示す。サンプルはヨウド造影剤を注入した家兎の耳で、検出器としてX線イ

メージインテ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、 $480\mu\text{m}$ の血管が観測できている。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

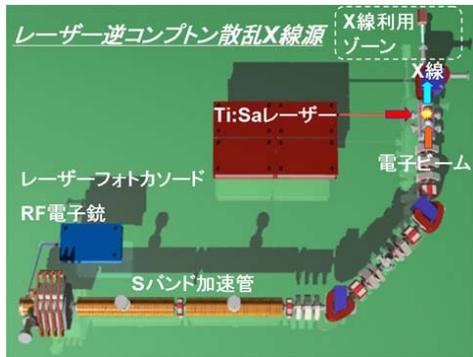


図 1 1 : LCS-硬 X線発生装置

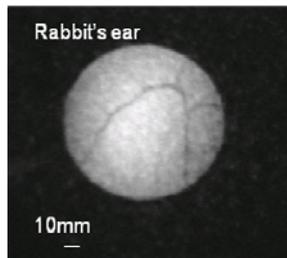


図 1 2 : 動画モードでの血管造影(家兎の耳)

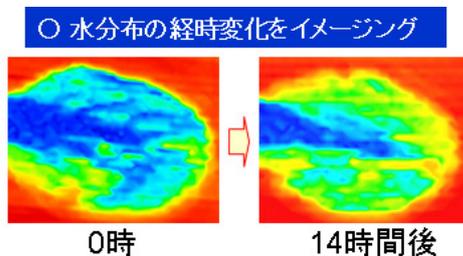


図 1 3 : テラヘルツ透過イメージング

で分解能が向上することがわかっている<sup>[9]</sup>。また、本装置はアクロマティックアークを用いた磁器パルス圧縮を行うことで、1ピコ秒以下の超短パルス電子ビームを生成可能であり、コヒーレント放射によるピーク出力kW級の高出力テラヘルツ光も生成できる。図 1 3 に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示す。植物の水分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。

### 3.5 その他の成果

針葉樹型カーボンナノ構造体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。針葉樹型のカーボンナノ構造体(図 1 4)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、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。そのため、室温で $100\text{mA}/\text{cm}^2$ 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 1 5 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。

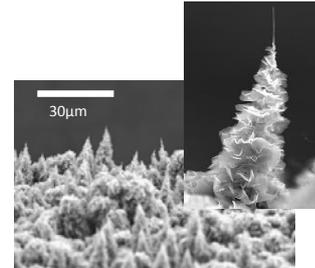


図 1 4 : 針葉樹型カーボンナノ構造体

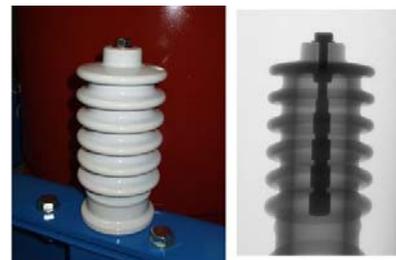


図 1 5 : 電極付き碍子(外径10cm) (左) とその X線透過像(右)

## 4. まとめ

産総研電子加速器施設は稼働開始から約30年が経過し老朽化も進む中、独自技術の組合せによって、世界的にも稀少な先端計測が可能な量子ビーム施設として成果を上げてきている。しかしながらより効率的で産業に貢献可能な施設の構築のため、今後数年間で大幅な見直しが必要と思われる。既に導入している高輝度Sバンド小型リニアックに加えて、超伝導加速器等の導入も予定されている。

## 参考文献

- [1] M.Kato et al., AIP Conf. Proc. **879**, 1129 (2007).
- [2] M.Kato, N. Saito, et al., Nucl. Instr. and Meth. **A 621**, 209-211 (2009).
- [3] Kikuzawa et al., Appl. Phys. Express **2**, 036502 (2009).
- [4] T.Hayakawa et al., Rev. Sci. Instrum. **80**, 045110 (2009).
- [5] K.Yagi-Watanabe et al., Rev. Sci. Instrum. **78**, 123106 (2007).
- [6] M.Tanaka et al., J. Synchrotron Rad. **16**, 455 (2009).
- [7] K.Yamada et al., Nucl. Inst. and Meth. **A528**, 268 (2004).
- [8] N.Sei et al., Opt. Lett. **34**, 1843 (2009).
- [9] K.Yamada et al., Nucl. Inst. and Meth. **A608**, S7-S10 (2009).