

## PROJECT OF INTENT LIGHT SOURCES IN THE TERAHERTZ REGION WITH THE COMPACT S-BAND LINAC OF AIST

Norihiro Sei<sup>1,A)</sup>, Hiroshi Ogawa<sup>A)</sup>, Masato Yasumoto<sup>A)</sup>, Hiroyuki Toyokawa<sup>A)</sup>, Ryunosuke Kuroda<sup>A)</sup>,  
Masaki Koike<sup>A)</sup>, Kawakatsu Yamada<sup>A)</sup>, Fumio Sakai<sup>B)</sup>, Terunobu Nakajyo<sup>B)</sup>, Tatsuya Yanagida<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>Advanced Industrial Science and Technology

1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568

<sup>B)</sup>Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

2-1-1 Yato-cho, Nishitokyo, Tokyo, 188-8585

### Abstract

We plan intent light sources in the terahertz region with the compact S-band Linac of AIST. Output power of coherent radiation from the 90-degree bending magnet is estimated to be about 0.18  $\mu\text{W}/1\% \text{b.w.}$  at a wavelength of 6.6 mm with the present electron beam. The electron beam of the compact S-band Linac will be improved, so that the output power of the coherent radiation will be more intent. Free electron laser oscillations will be able to offer the output power of 100 mW at around 300  $\mu\text{m}$ .

## Sバンド小型リニアックを用いたテラヘルツ帯光源開発の計画

### 1. はじめに

電波と光の中間に位置するテラヘルツ波は、従来光源の入手が困難であったことからその利用に関しては未開拓であったが、近年の光源開発の進展に伴い、生体や生産ラインにおける無侵襲イメージングへの利用が注目を集めている<sup>[1]</sup>。テラヘルツ波の需要の増大に呼応するように、例えば工場検査の効率化のような、高輝度化を切望する声が高まって来ている。この波長帯において大出力を期待できる光源としては、加速器を用いた光源が有力であり、国内外で幾つかの施設が稼働している他、新たな光源開発も盛んに進められている<sup>[2-4]</sup>。

産総研では、2005年より住友重機械工業と共同で、40MeV Sバンド小型リニアックとフェムト秒レーザーを用いたレーザー逆コンプトン散乱X線源の開発と利用研究を行っている<sup>[5-6]</sup>。産業界での利用を考慮して開発のコンセプトに小型化を謳っており、電子銃や加速管、クライストロン電源など制御系を除く全ての加速器システムが10m四方の部屋に収められている。1 nC/pulse程度の高い電荷量と3ps程度の短いパルス幅という電子ビーム特性を有しており、今後更にカソード材料の選択による高電荷化やパルストレーン入射レーザーの開発による高電流化、アクロマティック偏向部の最適化による短バンチ化の計画が建てられている<sup>[7]</sup>。これらの電子ビーム改良は、実はテラヘルツ波発生にとっても有益な改造になりうる。そこで当所では、この加速器システムを用いた高強度のテラヘルツ帯放射光源を開発する計画を進めている。本論文で

は、まずSバンド小型リニアックの特徴について概説し、次に現在準備が進められている偏向磁石からのコヒーレント放射について、期待される光源としての性質を評価する。コヒーレント放射では得難い1THz付近の波長に対しては、自由電子レーザー(FEL)による高輝度光源の開発を検討しており、最後に未確定ではあるがFEL発振計画について概説する。

### 2. 産総研Sバンド小型リニアック

産総研におけるSバンド小型リニアックは、加速器による短パルスX線の産業利用を目指して開発が進められている<sup>[6-7]</sup>。その加速器構成要素は、低エミッタンスかつ大電荷を取り出せるフォトカソード電子銃、電子ビームを収束させるソレノイドコイル、電子を40MeVまで加速する2本の1.5m定在波加速管、散乱電子の後方加速を避けバンチ長を収束させるアクロマティックアーク、レーザー逆コンプトン散乱の収量を増大させるためにビームサイズを収束させるトリプレットである。レーザーとの衝突を終えた電子ビームは再び収束されることなく90度偏向磁石によってビームダンプへ導かれる。加速後の電子ビーム特性を示している表1からわかるように、短いバンチ長と大きい電荷量が特徴であり、レーザー逆コンプトン散乱後に捨てるには惜しいほど高品質である。現状ではこのシステムで発生するX線の収量は毎秒 $10^7$ 個程度であり、タンパク質の構造解析を始めとする応用実験には不十分なため、リニアックの改造も幾種かがパラレルに進められている。即ち、カソード材を

<sup>1</sup> E-mail: sei.n@aist.go.jp

表1 現状における加速後の電子ビーム特性

エネルギー	20 ~ 40 MeV
電荷量	0.8 ~ 2 nC
エミッタンス	3 $\pi$ mm mrad
エネルギー拡がり	0.2 %
バンチ長	3 ps
繰り返し	10 Hz

Mg及びCs-Teへ交換することにより電荷量を5nCまで増大させること、アクロマティックアークの最適化によりバンチ長を0.5psまで圧縮すること、入射レーザーをパルストレイン化しマクロパルスに100個程度の1nCマイクロパルスを形成すること、繰り返しを25~50Hzまで増加させることなどである。これらの改造を組み合わせることができれば、更にテラヘルツ波発生にとって魅力的な電子ビーム特性になる。改造の詳細は文献7に記述されている。

### 3. コヒーレント放射

短バンチ相対論的電子ビームからテラヘルツ帯の放射光を得るには、偏向磁石からのコヒーレント放射を利用すればよい<sup>[3]</sup>。コヒーレント遷移放射でも強力なテラヘルツ帯光源となりうるが、Sバンド小型リニアックはレーザー逆コンプトン散乱によるX線利用を目的に開発されており、発光点から観測点までの距離を短くするため、衝突チャンバーから下流には新たな構成要素を挿入できる空間がない。バンチ圧縮を行うアクロマティックアーク以降には45度偏向磁石と90度偏向磁石の2箇所偏向部があるが、コヒーレント放射光を広い立体角で射出可能な90度偏向磁石を利用して、テラヘルツ帯光源の開発を始めている。

まず、90度偏向磁石の真空チャンバーを更新し、有効径96mmの結晶水晶ビューポートを取り付けた。図1にコヒーレント放射光の射出経路を示す。このポートからは、X線射出軸から16.2~23.8度の放射光を取り出すことができる。シミュレーションコードTRACE-3Dによれば<sup>[8]</sup>、

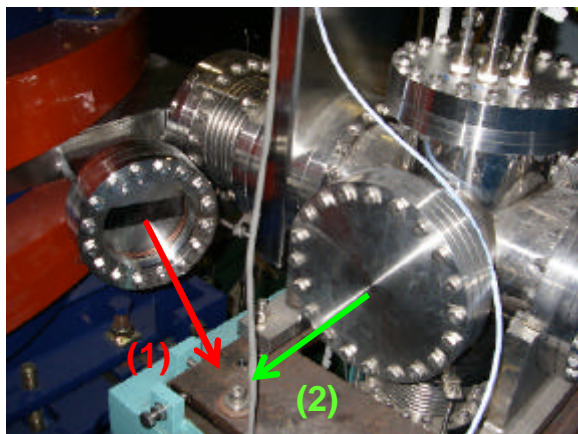


図1 90度偏向磁石の20度偏向角射出経路(1)と0度偏向角射出経路(2)。(2)は現在整備中である。

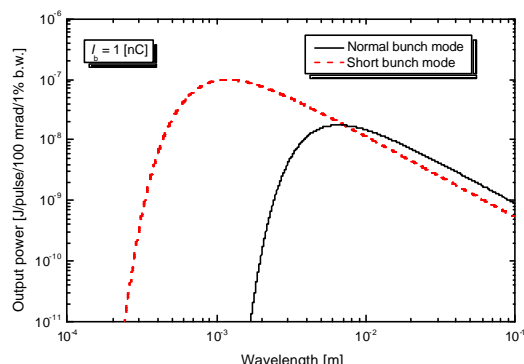


図2 現状の電磁石設定(実線)と短バンチ化した電磁石設定(波線)において評価したコヒーレント放射スペクトル。

X線発生実験の電磁石設定付近では、偏向角20度付近におけるバンチ長の変化が比較的小さい。衝突点での水平方向のビームサイズを0.28mmに広げた場合、射出角において電子バンチは2.8psから2.9psへと変化する。90度偏向磁石の真空チャンバーが遮断効果を与えるバンチ長は約4psであるので、真空チャンバーによるコヒーレント放射の損失は無視して良い。電子エネルギーを40MeV、電荷量を1nCとして、立体角100 $\times$ 40 mrad<sup>2</sup>におけるコヒーレント放射光スペクトルを評価すると、図2が示す結果が得られた。10Hz運転の場合は、ピーク波長6.6mmにおいて1%のエネルギー幅に約0.18 $\mu$ Wの出力が期待できる。シミュレーションによれば、この設定では電荷量を増大させてもバンチ長の変化は極めて小さい。そこで、カソード材の交換により5nCの電荷量を加速できるようになれば、コヒーレント放射光の最大出力は4.4 $\mu$ W/1%b.w.になるであろう。バンチ長測定及びコヒーレント放射光の観測は今秋以降に行う予定である。

従来のX線利用実験の設定では、5~10mmという比較的最長い波長で $\mu$ Wオーダーの出力が得ることがわかった。これより短い波長で、しかももっと強い出力を得るには、アクロマティックアークにより更にバンチ圧縮を行わねばならない。最近の研究によれば<sup>[5-6]</sup>、X線射出軸上の電子ビーム軌道においてバンチ長を0.5ps程度まで圧縮することがわかった。短バンチ化すると90度偏向磁石の中で著しくバンチ長を変えるため、図1の(2)で示したようにX線射出軸に近い射出角のコヒーレント放射を利用する。この場合、利用できる射出角は0~3.3度である。X線と同時利用する場合には、X線射出軸の光は反射できないので更に射出角は小さくなる。角度変化に対するバンチ長の変化が大きいため、射出角1度付近でバンチ長が最小となるようにシミュレーションを行った。この場合、(2)の経路では0.43~0.74psのバンチ長を持つ電子バンチからの光を伝播することになる。このバンチ長の変化を考慮してコヒーレント放射光スペクトルを評

価したのが図2の波線である。最大出力となる波長が1.2mmまで短くなり、1パルス当たりの出力も増大していることがわかる。短パルスの設定では、電荷量を増大させるとバンチ長の増大も無視できなくなるので、強いコヒーレント放射出力を得るにはパルス数を増大させた方がよい。1マクロパルスあたりに100個程度のマイクロパルスを作り出すパルストレーン化に成功すれば、0.1mW/1%b.w.程度の平均出力を期待できる。この値は既存のテラヘルツ光源と同等ではあるが、ピーク出力は大きく、更に他の光源とは異なり広い波長域にわたって同時に放射されるので、特色ある利用実験も可能になるであろう。

#### 4. テラヘルツ帯自由電子レーザー

無侵襲イメージングなど最近のテラヘルツ帯利用の動向を見ると、サブミリ波帯の利用が盛んに研究されている<sup>[1]</sup>。この波長帯で波長可変性を有し、平均出力が10mWを超える光源を開発する意義は十分にある。低エネルギー電子ビームによるコヒーレント放射では、この波長帯で高出力を得ることは困難であり、産総研では次のステップとしてFELによる光源開発を考えている。Sバンド小型リニアックの改良に合わせて、共振器を使用しない単一通過型FELであるSASEと共振器を使用するFELとについて検討している。

X線利用実験と平行してFEL開発を行う場合は、ビーム輸送とバンチ伸張を兼ねたアーク部とアンジュレータとが必要になる。特にSASEの場合には、アンジュレータによる電子バンチの同期条件からの遅れを考慮し、10ps程度までバンチを伸張しなければならない。SASEはシングルバンチでも発振可能なので、現状の加速器システムに対しても評価ができる。そこで電荷量2nCかつバンチ長10nsの電子ビームと周期長100mmかつK値4.49のアンジュレータとを使用した場合に対して、単純な1次元モデルで増幅過程を計算すると図3が得られた。この図から波長100~300 $\mu$ mでSASEを飽和させるには、アンジュレータ長が2.6m必要になることがわかる。Sバンド小型リニアックの改良のひとつに、シングルバンチの電荷量を増やすことがあり、4nC以上にできればアンジュレータ長は2m以下になる。SASEの利点は光共振器を必要としないため、光パルスと電子バンチとの同期を取らなくて良いことと、光共振器での損失が生じないことである。

SASEに対し、光共振器を利用したFELで発振させるには、少なくともパルストレーン化の改良が必要になる。各マイクロパルスのエネルギーの揺らぎをエネルギー拡がり程度まで小さくすることは困難が予想されるが、マイクロパルスの電荷量が0.1nC程度に小さくてもFELパラメータを0.01以上にすることが可能である。マイクロパルス数が数十個あればアンジュレータ長は1m以下でも充分で、マイクロパルス間隔も12.6nsと短いために、SASEよりもコンパクトにすることがで

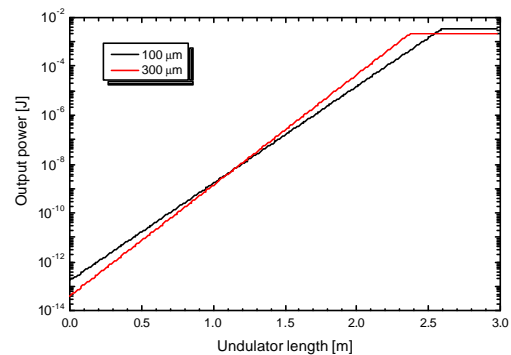


図3 電荷量2nCかつバンチ長10nsの電子ビームと周期長100mmかつK値4.49のアンジュレータを使用した場合の増幅過程に対する1次元シミュレーション。

きる。仮にパルストレーン化の目標である1nC・100マイクロパルスが実現すれば、100mWの出力が可能になる。FEL開発の指針は、今年度に予定されている電荷量の増大やパルストレーン化の実績を見ながら判断していくことになるだろう。

#### 5. まとめ

本計画では、産総研で新たに開発中のSバンド小型リニアックの特徴を活かし、また開発の方向性を見据えて、テラヘルツ光源の開発に取り組んでいる。比較的長いミリ波の領域では、現状のX線利用実験に使用している加速器設定でサブ $\mu$ W/1%b.w.程度の出力が得られることがわかった。アクロマティックアークによるバンチ圧縮を0.5ps程度まで行いパルストレーン化も行えば、平均出力は波長1mm付近で0.1mW/1%b.w.にもなる。さらにFELまで発展させれば、平均出力は300 $\mu$ m付近の波長で100mWに達するだろう。具体的な取り組みとしては、今秋以降にバンチ長測定やコヒーレント放射光の観測を予定している。

#### 謝辞

本計画を進めるにあたり、コヒーレント放射光の発生及び測定について有益な助言をいただいた、大阪府立大学の奥田 修一氏及び京都大学の高橋 俊晴氏に深く感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] <http://www.terahertzjapan.com/>
- [2] S. Okuda *et al.*, Nucl. Instr. And Meth. A358 (1995) 244.
- [3] S. Okuda *et al.*, Nucl. Instr. And Meth. A445 (2000) 267.
- [4] M. Sobajima, *et al.*, Nucl. Instr. And Meth. A483 (2002) 240.
- [5] R. Kuroda *et al.*, Proc. of the 10th European Particle Accelerator Conference, Edinburgh, Scotland, 2006.
- [6] H Toyokawa *et al.*, in this proceedings.
- [7] R. Kuroda *et al.*, in this proceedings.
- [8] K. R. Crandall *et al.*, TRACE-3D User's Manual, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-90-4146.