

[12D-01]

A PROPOSAL OF R&D PROGRAM FOR FUTURE X-RAY FELS AT JAERI

Ryoichi Hajima ^{*)}, Eisuke J. Minehara

Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Ibaraki 319-1195 Japan.

Abstract

JAERI-FEL group proposes an R&D program for the future X-ray FEL in Japan. Feasibility study of X-ray FEL will be conducted through the development of high-gradient superconducting linac and other critical issues to realize a users facility of X-ray FEL. The program will include: building a 13m x 150m tunnel at JAERI-Kansai site, construction of 200MeV superconducting linac, development of a photo-cathode RF gun, demonstration of SASE-FEL in VUV down to 150nm, energy-recovery for the reduction of radiation at beam-dump.

原研における X 線 FEL 基礎研究の提案 — 第 4 世代放射光を目指して

1 はじめに

原研自由電子レーザーグループでは、X 線 FEL(第 4 世代放射光)の実現を目指した研究開発を提案している。本計画は、X 線 FEL(ユーザー利用施設まで含む)の実現に必要な要素技術開発を網羅する予定で、現在、木津地区への建設を前提に計画案をまとめている。本報では、X 線 FEL のユーザー利用施設建設に必要なとされる要素技術、並びに、これまでに検討してきた開発計画の概要を紹介する。

2 米国、ドイツにおける研究開発

米国では、SLAC/SSRL グループが提案している LCLS (Linac Coherent Light Source) の建設に向けた R&D が進行中である。LCLS は、SLAC リニアックを用いて、波長 1.5Å の X 線 FEL の実証を行なう装置である [1]。

DOE による第 4 世代放射光の開発政策に対する BESAC の答申として Leone Panel Report が 1999 年の 2 月に公開された [2]。このレポートは、8-20keV の hard X-ray 領域におけるコヒーレント光源の開発を第 4 世代放射光の最優先課題と位置づけ、LCLS-R&D への予算支出に実質的な Go サインを出した。

LCLS-R&D は、1999 年から 4 年間かけて LCLS のための要素技術の実証、利用研究の展望を行なうものである。順調に計画が進めば、2003 年から LCLS の建設、1.5Å の発振実証と先行的な利用研究が行なわれ、その後、第 4 世代放射光のユーザー利用施設である AXS (Advanced X-ray Sources) の建設へと進む。本報では、Leone Panel Report にならって、

AXS を「複数のアンジュレータ(ビームライン)を備えた high-duty の X 線 FEL 施設」と定義することに。米国の計画では、AXS は超伝導リニアックを使った装置となる予定である [3]。

一方、ドイツでは、リニアコライダ計画 TESLA の一部として X 線 FEL の研究開発が行なわれている。TESLA-FEL は、複数のアンジュレータを備え、1Å までのコヒーレント X 線をユーザーに供給する施設となる予定である [4]。現在は、Tesla Test Facility で TESLA の R&D が進行中であり、FEL の実験(TTF-FEL)も行なわれている。TTF-FEL では、phase-I (390MeV) で 40nm の発振、phase-II (1GeV、2003 年) で 6nm の発振を目指している。最近、100nm の SASE を観測したとの報告があった [5]。

3 本計画の位置づけ

すでに述べたように、米国における第 4 世代放射光の開発は、要素技術の開発(LCLS-R&D) 実証装置(SLAC/LCLS) 実用装置(AXS)となっており、ドイツでは、要素技術の開発と実証(TTF-FEL) 実用装置(AXS=TESLA-FEL)と進む予定になっている。

後発のわが国では、米国とドイツにおける開発研究の成果を積極的に取り込みながら、最短の道筋で第 4 世代放射光の実用装置(AXS)の建設へと進むことが望ましい。したがって、本計画は、R&D の対象を実証装置(LCLS 相当)とするのではなく、実用装置=ユーザー利用施設(AXS)におき、AXS に必要な要素技術の開発と実証を行なうことを目的とする。

^{*)}R.Hajima, hajima@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

4 X線 FEL ユーザー利用施設に必要な要素技術

X-ray FEL 実証装置 (LCLS 相当) に必要な要素技術として Leone Panel Report 中で言及されているものは、(1) エミッタンス $1\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 以下のビームを生成するフォトカソード RF 電子銃、(2) ビーム質を劣化しないビーム輸送、ビーム加速、バンチ圧縮、(3) CSR の影響の評価、(4) アンジュレータ中における電子ビーム位置の高精度な制御、(5) X線測定装置である。

LCLS-R&D および TTF-FEL における研究の進展を通じて、これらの課題の一部はクリアされつつある。フォトカソード RF 電子銃では、 0.9nC 、スライスエミッタンス $1.2\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ バンチ生成の実証 (BNL) [6]、ソレノイドとブースターを組み合わせたエミッタンス低減手法の提案 [7] などがある。また、バンチ圧縮では、CSR によるエミッタンス増大を抑制する方法の実験的検証 (ANL/APS) [8]、LCLS 体系を使った数値計算によるエミッタンス増大の評価 [9] が行なわれ、エミッタンス増大については解決の見通しが得られつつある。

X線 FEL ユーザー利用施設 (AXS) では、これらの要素技術に加えて、(1) 高加速勾配の超伝導空洞、(2) エネルギー回収による放射線発生の低減、などが必要となる。さらに、(3) 超伝導空洞を使ったフォトカソード RF 電子銃の開発も視野に入れるべきであろう。これらの開発課題について、以下に簡単に述べる。

4.1 高加速勾配の超伝導空洞

少なくとも 10GeV 以上の電子ビームが必要とされる AXS では、装置の建設コストを下げるために、できるだけ加速勾配の高い超伝導空洞が望まれる。

超伝導電子リニアックで実績のある空洞としては、JAERI-FEL (500MHz)、TESLA (1.3GHz)、TJNAF (1.5GHz)、S-DALINAC (3GHz) などがある。これらの空洞で得られている平均的な加速勾配は、JAERI-FEL ($5\text{MV}/\text{m}$)、TESLA ($15\text{MV}/\text{m}$)、TJNAF ($8.8\text{MV}/\text{m}$)、S-DALINAC ($6.7\text{MV}/\text{m}$) である [4][10][11]。AXS 用の技術開発としては、TESLA で実績のある L-band、もしくは S-band が候補となり、L-band、S-band とともに $15\sim 25\text{MV}/\text{m}$ が開発の目安となるであろう。

超伝導空洞の開発では、高加速勾配の実現とともに、 1nC 程度のバンチを安定に加速できることも条件になる。LCLS-R&D では、加速空洞中で生じるウェーク場によるビーム質の劣化を避けるためにコリメータでバンチの一部を落とす案が検討されている [9]。こ

れは、あえてバンチの電荷量を減らしても、ウェーク場によるエミッタンス増大を抑える方が FEL の発振には有利との判断に基づくものである。つまり、常伝導空洞ではウェーク場が FEL の特性に大きく影響を及ぼすのである。一方、超伝導空洞は、同じ周波数の常伝導空洞に比べて R_a/Q_0 (シャントインピーダンスと Q の比) が小さい分だけウェーク場の影響も小さくなるので、バンチの電荷量と低エミッタンスを両立したまま加速することが容易となり、常伝導のシステムに比べて短いアンジュレータで FEL 発振が得られる可能性がある。しかし、 1ps 以下のバンチを加速する AXS 特有の現象として指摘されているウェーク場によるクーパー対崩壊など検討すべき課題も残っている [12]。

4.2 エネルギー回収

AXS におけるエネルギー回収は、超伝導空洞に供給する RF パワーを節約し RF 源のコストを下げるという、エネルギー回収本来の目的だけでなく、ビームダンプの放射線発生および発熱を小さくするためにも必要である。

超伝導リニアックとエネルギー回収の組み合わせは、TJNAF-FEL の高出力自由電子レーザーで実績があり [13]、JAERI-FEL でも実験が始まろうとしている [14]。エネルギー回収装置の設計、運転で問題となるのは、アイソクロナスな輸送系の設計、高次収差および CSR によるビーム質の劣化がもたらすビーム電流損失の評価、RF 不安定性の制御などである。

4.3 超伝導 RF 電子銃

high-duty の運転が要求される AXS ではフォトカソード RF 電子銃も超伝導化することが望ましい。超伝導 RF 電子銃は、ドイツでは FZ-Rossendorf が [15]、米国では BNL と AES が [16] 開発を始めているが、カソードからの熱負荷やコンタミネーションといった超伝導空洞に直結する問題以外にも、ソレノイド磁場を使わずにエミッタンスの増大を抑制するといったビームダイナミクスの課題もあり、研究開発の余地が大いに残されている。

5 木津地区における研究展開の提案

われわれは、木津 (京都府) にある原研関西研究所 光量子科学研究センターにおいて、AXS の実現に向けた R&D を展開することを考えている。研究の展開は三段階に分けて実施する。

phase-I — $13\text{m} \times 50\text{m}$ の加速器建屋建設 (地下トンネル構造)、東海研に設置してある超伝導加速器と

FEL 装置の移転、高加速勾配超伝導空洞の開発。
phase-II — フォトカソード RF 電子銃 (常伝導)、200MeV 超伝導リニアック、SASE 実験用アンジュレータの設置。

phase-III — 建屋の延長 (150m)、リニアックの延長 (~1GeV)。

新たに設置する超伝導リニアックは、既存の空洞 (500MHz) と連携して使用するために、整数倍の周波数 L-band(1.5GHz)、または、S-band (3GHz) が候補となる。パンチ圧縮、ウェーク場などによるビーム質の劣化を検証するためには、通常の空間電荷効果が無視できるエネルギーまで加速してやる必要がある。エネルギー 200MeV は、この条件から決定した。TESLA の実績値 (15MV/m) の加速勾配が得られれば、15m 程度で 200MeV まで加速可能である。高加速勾配の開発目標の目安である 25MV/m が得られれば、同一の加速距離で 330MeV の電子エネルギーも可能となる。

phase-II では、AXS で要求される特性 (低エミッタンス、大ピーク電流) を持った電子ビームの開発を行なう。また、この電子ビームを使った SASE の実験 (VUV 領域、~150nm) を行ない、アンジュレータ中の電子ビーム軌道の制御など AXS に必要な要素技術開発を行なう。

phase-III では、軟 X 線領域 (6nm) の SASE 実験を行ない、フェムト秒 X 線パルスの測定、外部レーザー光と X 線パルスの協調的利用 (10 フェムト秒オーダーの同期) に必要な技術開発を行なう予定である。

われわれ、原研 FEL グループは、国内唯一の超伝導電子リニアックの開発運転実績を持ち、最近では、熱陰極電子銃としては最高水準の電子ビーム輝度到達 (5ps、20 π mm-mrad、100A)、FEL 出力 2.3kW の記録達成などの成果をあげている [17]。

一方、光子科学センターは、現在、T³ レーザー、X 線レーザーといった先端的なレーザーシステムの開発を進めており、また、これらのレーザーを構築するのに必要な基盤技術の整備にも積極的に取り組んでいる。さらに、フォトカソード RF 電子銃の開発実績もある (レーザー加速グループ)。

Leone Panel Report では、「加速器ベースの光源 (AXS) と超短パルス高強度レーザーの協調的な関係」の重要性が繰り返し述べられている。木津地区における AXS の R&D は、まさに、この協調的な関係を実践するものと言えるだろう。AXS 施設においてレーザー装置の担う役割は、フォトカソード照射、X-ray

パルスと組み合わせたポンプ / プローブ実験、seed 光入射のオプション、Bragg スwitching を使った X-ray パルスの切り出しなど枚挙にいとまがない。また、AXS で必要となるフェムト秒 X-ray パルスの測定装置開発には、超短パルスレーザーの診断 / 測定で培われてきた経験が役に立つであろう。

6 まとめ

X 線 FEL ユーザー利用施設 (AXS) の実現に向けた基礎研究の提案を行なった。木津地区 (原研光子) における超伝導リニアックベースの研究開発は、わが国における AXS を最短の道筋で実現するものと考えられる。

hard X-ray 領域のコヒーレント光源は、ポストゲノムの主役であるタンパク質の構造解析・機能解析において革新的な進歩をもたらすことが予想されるなど、次世代の科学技術を進展させる上で強力な武器となるであろう。先行する米国、ドイツにこれ以上の遅れを取らないためにも、わが国における AXS 開発の体制をすみやかに整えることが望まれる。

参考文献

- [1] M. Cornacchia, Proc. PAC-1999, 267-271.
- [2] Report of the Basic Energy Sciences Advisory Committee Panel on Novel Coherent Light Sources (1999).
- [3] D. Mills, Workshop on the Marriage of High Intensity Lasers with Synchrotrons, U. Michigan, Feb.21-22, 2000.
- [4] B.H.Wiik, Nucl.Instr.Meth. **A398** (1997) 1-17.
- [5] J.Rossbach, private communications, and to be presented at EPAC-2000.
- [6] M.Babzien et al., Phys.Rev. **E57** (1998) 6093-6100.
- [7] J.B.Rosenzweig et al., in Proc. PAC-1999, 2039-2041. M. Ferrario et al., to be presented at EPAC-2000.
- [8] Michael Borland, private communications, and to be presented at LINAC-2000.
- [9] LCLS Newsletter 00-09, May.8.2000.
- [10] C.E.Reece, Proc. 8th Workshop on RF Superconductivity (1998) 138-144.
- [11] S.Döbert et al., *ibid*, 176-183.
- [12] P.Hülsmann et al., *ibid*, 159-175.
- [13] G.R.Neil et al., Phys.Rev.Lett. **84** (2000) 662-665.
- [14] R.Hajima et al., Nucl.Instr.Meth. **A445** (2000) 384-388. T.Shizuma et al., to be presented at EPAC-2000. R.Hajima et al., to be presented at EPAC-2000.
- [15] E. Barhels et al., Nucl.Instr.Meth. **A445** (2000) 408-412.
- [16] M. Cole et al., to be presented at LINAC-2000.
- [17] E.J.Minehara et al., in this Proc.