超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発

高エネルギー加速器研究機構 浦川 順治

I. はじめに

2008年9月から文部科学省委託事業として、表記の量子ビーム技術プログラムの基盤技術開発が始まった。目的は10 m サイズ規模の小型線形加速器で十分に利用に供せる平均輝度およびピーク輝度のX線ビームを生成できる基盤技術を開発して、2012年度にその実証実験を行い、小型高輝度光子ビーム源の実用化設計案を提示することである。本計画のために、大強度線形加速器と大強度高繰返しレーザー蓄積装置による逆コンプトン散乱過程を利用した準単色・短パルス・準連続X線生成を行う最先端基盤技術開発が、多くの利用者の要望に適した小型高輝度光子ビーム源装置製作に合っていると判断した。そこで光高周波電子源およびレーザー蓄積共振器開発の10年以上の技術蓄積と実績に基づいた詳細な提案書を文科省に提出した。その結果、本委託業務が5年計画として採択された。現在、責任を背負って、多くの参画機関の協力を得て本事業を推進している。

計画の概要、大強度レーザー蓄積装置開発と加速器基盤技術開発状況および今後の計画について報告する。

II. 計画の概要

提案書の300字概要は「超伝導高周波加速器技術とレーザーパルス蓄積技術の融合によって、ポストゲノム時代の生命科学研究、ナノ構造解析、創薬、医療診断、マイクロリソグラフィへの利用を画期的に飛躍させる軟X線から硬X線領域の小型高輝度X線発生装置(10 m×6 m 程度)を実現する。本装置実現のために、高品質大強度電子ビーム生成装置、大強度・高電界超伝導高周波加速装置、高品質短パルス大強度レーザー蓄積装置、ミクロン精度での電子ビーム軌道制御技術および、レーザー光路精密調整といった技術の実用化を図る。また、レーザーパルス蓄積装置をアンジュレータに置き換えることによってテラヘルツ波から赤外線の高輝度光子ビーム生成も可能である」である。

本委託事業採択後、装置の基盤技術開発を進めながらその3次元装置概念図を作成した。第1図に示すように、高周波電子源からビームダンプまで超伝導高周波電子線形加速器の先端技術開発が必要であり、さらにマル

チ短バンチ光電子ビームおよびX線を生成するための高繰返し大強度パルスレーザーが必要である。図では5 Hz、1 ms 大強度パルス電子ビーム運転を仮定しているので、He 冷凍システムが小さなものになっている。また、減速超伝導空洞1台をX線発生後偏向電磁石で電子ビームを曲げた後に設置して、ビームのエネルギーを約1 MeV 以下にしてからビームダンプに捨てる設計にした。

総合技術蓄積、総合システム構築および性能実証実験は高エネルギー加速器研究機構(KEK)の超伝導リニアック試験施設(STF)で行う。この装置の基盤技術開発を若手研究者が自主的に行い、その研究指導および開発過程で新しい技術を確立させることによって、若手研究開発者を育てることも本事業の目的である。本委託事業の活動状況は<http://kocbeam.kek.jp/index.html> で公開して、常に最新の成果等が納税者に理解して頂けるように努めている。また、年3回以上、高輝度光子ビーム源開発室ニュースを配布して、本プログラム関係者および一般の方々へ関連する最新技術の開発状況の周知を図っている。皆様のご理解とご支援を得て、社会に貢献できる最先端加速器基盤技術を確立する予定である。

III. 大強度レーザー蓄積装置開発

大強度高繰返しレーザーパルスを10 μm (σ)程度に絞り込み、さらに電子ビームも同程度サイズに絞り込み衝突させて、レーザーを効率よくX線ビームに変換する。通常10度程度の衝突角を持つように超高真空衝突チェンバの中に高反射率ミラーで構成した光共振器とレーザーパルスを通す小さな穴を持った電子ビームダクトを取り付ける。レーザーの位置を1 μm 以内の精度で

第1図 小型高輝度光子ビーム源の3次元装置概念図

Development for Next Generation Compact High Brightness Photon-beam Source by Superconducting Accelerating Linac: Junji URAKAWA.

(2010年 5月30日 受理)

2 次元的に移動して電子ビームと衝突調整する。両ビームの衝突時間精度は 1 ps 以内にする必要があるので、電子加速高周波とレーザーパルス発振器は高精度で同期させる。現状、100 fs (σ) 程度の同期が実現できる状況にある。電子線形高周波加速器では、電子バンチ長 10 ps (FWHM) の高品質マルチバンチビームを必要なエネルギーまで加速する。本開発プログラムでは 30 MeV から 50 MeV の最大エネルギーを想定して、1 m 長の超伝導高周波加速空洞を使う。光高周波電子銃を使って 5 MeV マルチバンチ電子ビームを発生して、超伝導高周波加速空洞 35 MV/m 1 台で加速することによって、40 MeV の大強度電子ビームを衝突チェンバーへ輸送する。この線形加速器では最高性能で運転できた場合、40 MeV の最大エネルギーの実現可能性があるということになるので、実証実験では 2 台の 1 m 長超伝導高周波加速空洞を電子ビーム加速に使う予定である。

大強度レーザー系への要求は以下ようになる。

- (1) レーザーパルス生成は 100 MHz 以上
- (2) 共振器内レーザーパルスエネルギーは 10 mJ 以上
- (3) 衝突点でのレーザーサイズ 10 μm (σ) 程度

このレーザー平均パワーは 1 MW 以上になるので、現在、レーザー開発の研究所で実現されている 100 kW の 10 倍以上になる。ファイバーレーザー増幅と光共振器を使った新しいレーザー大強度化の実験を昨年からはじめた。すでに、ミラーやファイバーを何度か破壊してしまい、問題点を克服しながら高い目標に向かっている。国際特許の申請をしているので、詳しい説明を省く。

一方、レーザーサイズを 10 μm (σ) 程度に絞り込むために、新 4 枚ミラー光共振器の開発を進めている。光共振器の共鳴状態を維持するには、高反射率ミラーの位置を圧電素子でオングストローム程度の精度で安定に制御する必要がある。つまり光共振器への入射レーザーの位相と光共振器内の蓄積レーザーパルスの位相を合わせて、レーザー蓄積を可能にしている。2 枚ミラー光共振器で入射レーザーエネルギーの 1,000 倍の蓄積と衝突点でのレーザーサイズ 30 μm (σ) を実現している。新 3 次元 4 枚ミラー光共振器は複雑な装置であるが、蓄積増幅率を 10,000 倍以上で、レーザーサイズを 10 μm (σ) 以下にできるモデル計算があり、現在、この装置のプロットタイプで基本性能試験を行っている。

IV. 加速器基盤技術開発

高品質マルチバンチ電子ビーム生成では、すでに 1.6 cell S-band RF Photo-cathode Gun を使って 0.5 nC/bunch, 300 bunches/pulse 運転によりマルチバンチビーム負荷補正や電子ビーム収束実験を行った。電子バンチの規格化エミッタンスは 0.5 mmmrad 以下にするので、バンチ強度を 0.5 nC/bunch 以下とする。2010 年秋には 3,000 bunches/pulse 運転を行い、軟 X 線生成による利用試験を開始する。可能であれば 8,000 bunches/

pulse 運転も行い、軟 X 線強度を上げることによって実用化の意義を明らかにしたい。

KEK は国際リニアコライダー計画 (ILC) およびエネルギー回収型ライナック (ERL) の将来計画に必要な超伝導加速空洞開発を精力的に進めている。パルス運転 30 MV/m と CW 運転 20 MV/m の 1.3 GHz 9-cell superconducting cavity 製作技術開発を本空洞開発者をお願いした。現状、製作した空洞の 25% がパルス運転で 30 MV/m 以上を達成している。2011 年までにはパルス運転用空洞製作技術が確立して、実用的な空洞 2 台が実証実験に供される計画である。

電子ビームとレーザーパルスは 10 μm (σ) まで絞り込み、安定なマルチバンチ衝突により高輝度 X 線生成を実現するには最先端ビーム制御技術が必要である。そのために S-band RF Gun と 3 m S-band 加速管を使った LUCX (Laser Undulation Compact X-ray) 装置で、逆コンプトン散乱による X 線生成の総合基盤技術を開発している。放射線医学総合研究所の先進小型加速器事業の装置を拡張して、X 線検出器開発や干渉性回折電磁波放射実験も可能のように現在組み替えている。2010 年 5 月から電子ビーム・レーザー衝突実験を再開した。

V. 今後の予定

レーザー蓄積装置の平均パワーを 100 kW から 1,000 kW に上げる技術開発を 2010 年と 2011 年で行いながら、電子ビームとレーザーパルスの衝突実験により高輝度 X 線生成が可能であることを示す。そこで実用のためのサンプル照射実験を LUCX 装置で行い、実用化のための技術蓄積を進める。さらに超伝導加速器設備を 2011 年度に完成させて、最終の実証実験を 2012 年の秋まで行うことになっている。ここでは 162.5 MHz で 1 ms pulse 長のマルチバンチ電子ビーム生成 (162,500 bunches/pulse) を行い、加速することになる。バンチ当たりの電子ビーム強度を 0.1 nC/bunch と仮定しても、16 mA の電子ビーム強度になる。本実験終了後、レーザー装置等は Compact ERL 装置に移設して、CW 高輝度 X 線生成実験に使えるようにする。Compact ERL がビーム運転を行っていれば、そこでも応用実験の試験が可能になる。

— 参考資料 —

- 1) J. Urakawa, *Nucl. Instrum. Methods. A* (2010), doi:10.1016/NIMA.2010.02.019.

著者紹介

浦川順治 (うらかわ・じゅんじ)

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設
(専門分野/関心分野) 加速器科学/加速器応用