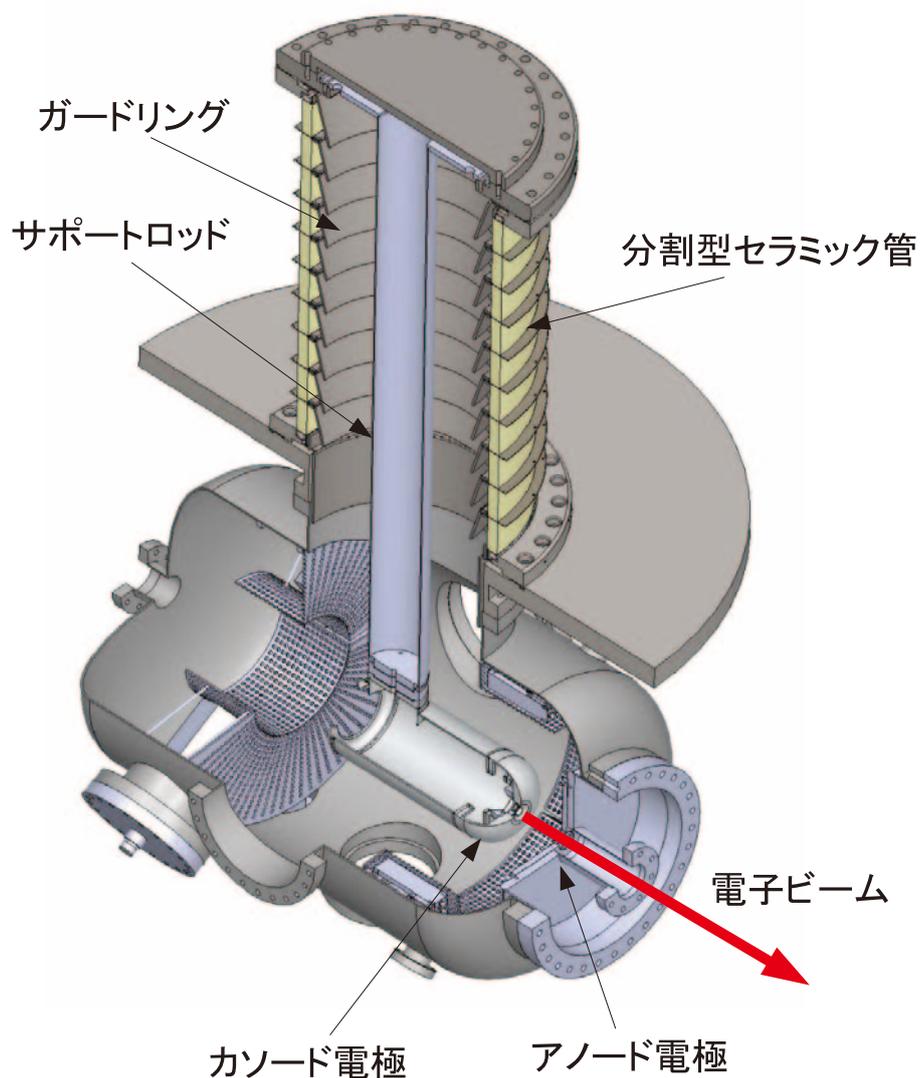


Feb. 2010

高輝度光子ビーム源開発室 ニュース

Quantum Beam Technology Program supported by MEXT

Vol.3



世界最高電圧のフォトカソード DC 電子銃が完成：本文7ページを参照



高輝度光子ビーム源開発室ニュース Vol.3 をお送り致します。ニュース Vol.3 の記事として、最新の Yb fiber laser 増幅を利用した実用化の話と 9-cell Super Conducting Cavity 開発報告を担当者をお願い致しましたとニュース Vol.2 で記述しましたが、多くの方々から次世代小型高輝度光子ビーム源開発の報告と 500kV 世界最高電圧達成報告

の要望がありましたので、急遽前半の記事を浦川が書き、後半の素晴らしい達成報告を羽島良一氏に御願いしました。ニュース Vol.4 の記事はニュース Vol.2 で予告しました内容になる予定です。ご期待下さい。以下「量子ビーム基盤技術開発プログラム」シンポジウムの案内です。参加費無料ですので、時間が許せば是非ともご参加下さい。

文部科学省「量子ビーム基盤技術開発プログラム」シンポジウム

日時：平成 22 年 2 月 25 日（木）10:00～18:00

会場：コンファレンススクエア エムプラス
(東京都千代田区丸の内 2-5-2 三菱ビル 10F)

入場：無料

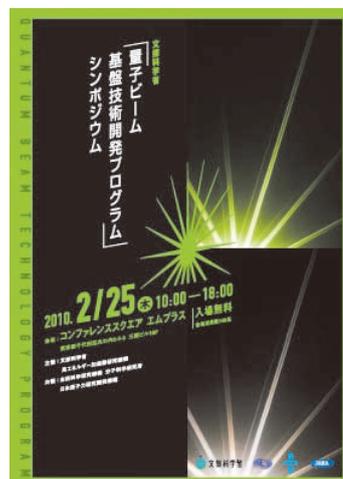
主催：文部科学省

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

共催：大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 分子科学研究所
独立行政法人 日本原子力研究開発機構

シンポジウム URL：http://kocbeam.kek.jp/qb_sympo.html

参加登録・お問合せ先：「量子ビーム基盤開発プログラム」シンポジウム 事務局
(高エネ研内) E-mail: quantumbeam@ml.post.kek.jp



<プログラム>

10:00	開式の辞	井上 信 (京都大学)
10:10	挨拶	高谷 浩樹 (文部科学省)
10:15	挨拶	高崎 史彦 (KEK)
10:20	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	浦川 順治 (KEK)
11:10	荷電粒子および光子と物質との相互作用 — 基礎研究の現状とその応用・社会との接点 —	旗野 嘉彦 (JAEA)
12:10	昼食	
13:40	リング型光源とレーザーを用いた光発生とその応用	加藤 政博 (NINS)
14:20	軟X線の高速偏光制御による機能性材料の探究と創製	雨宮 健太 (KEK)
15:00	先端加速器が創る 新しい産官学連携のかたち	有馬 雅人 (先端加速器科学技術推進協議会)
16:00	休憩	
16:20	多様なイオンによる高精度自在な照射技術の開発	神谷 富裕 (JAEA)
17:00	中性子ビーム利用高度化技術の開発	加倉井 和久 (東北大学)
17:40	閉式の辞	平井 康晴 (佐賀県立九州シンクロtron光研究センター)

■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

はじめに

2008年9月から文部科学省委託事業として、量子ビーム技術プログラムの表記の基盤技術開発事業が始まった。目的は10m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、5年目の最終年度にその実証実験を行い、小型高輝度光子ビーム源の製品化設計案を企業に提案することである。この開発計画のために、大強度線形加速器と大強度高繰り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部科学省に提出した。その結果、本委託業務が5年計画として採択された。現在、多大なる責任を背負って、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、組織、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。

計画の概要

提案書の300字概要は以下のように書いた。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(10m×6m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及び、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。

本委託事業採択後、目標とする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。図1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全て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り返し大強度パルスレーザーが必要である。図1

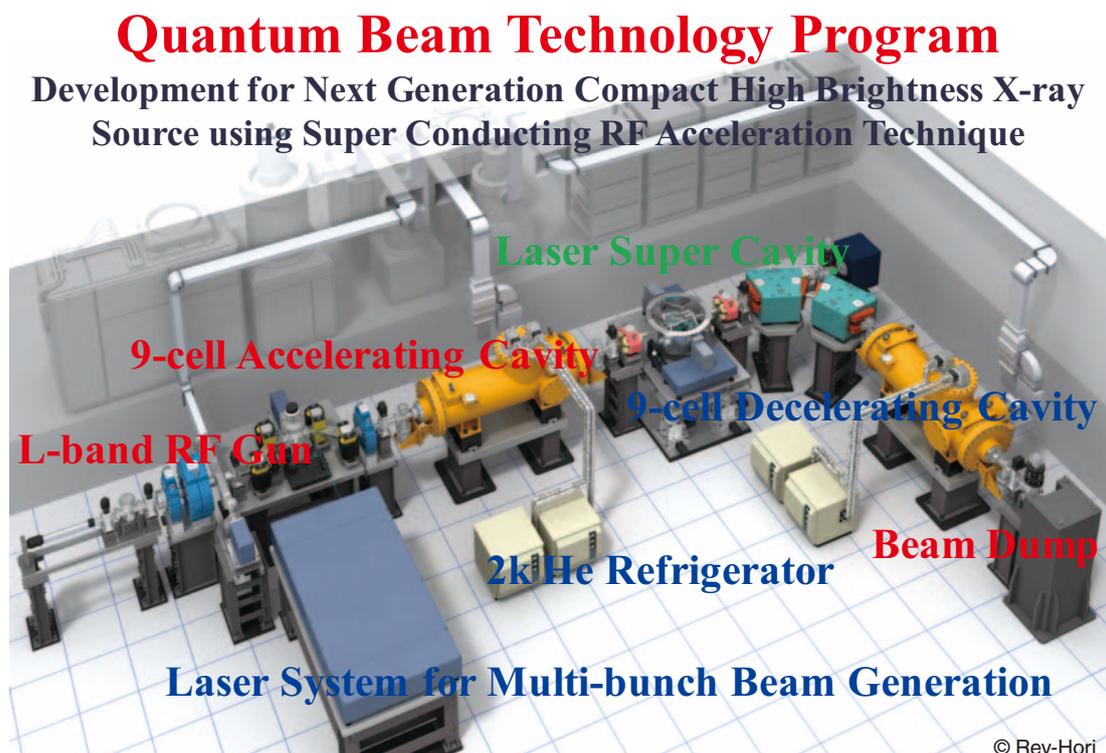


図1：小型高輝度光子ビーム源の3次元装置概念図

では 5Hz, 1msec 大強度パルス電子ビーム運転を仮定しているため、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 1MeV 以下にしてからビームダンプに捨てる設計になっている。

基盤技術の研究開発組織関連を図 2 に示す。総合技術蓄積、総合システム構築および性能実証実験は幹事機関である KEK が中心になって行う。この装置に関わる基盤技術開発を若手研究者が自主的に進めて、その研究指導および開発過程で新しい技術を確認させることによって、優秀な若手研究開発者を育てることも本事業の目的であると考えている。

大強度レーザー蓄積装置開発

大強度高繰り返しレーザーパルスを 10 μ m (sigma) 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(光子ビーム)を効率良く 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ャンバー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 μ m 以内の精度で 2 次元的に移動させて電子ビームと衝突させる。両ビームの衝突時間精度は 1psec 以内にする必要があるため、電子加速高周波とレーザーパルス発振器のモードロック信号は高精度で同期させる。現状、100fsec (sigma) 程度の同期が実現できる状況である。電子線形高周波加速器では、電子バンチ長 10psec (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 30MeV から 50MeV の最大エネルギーを想定して、1m 長の超伝導高周波加速空洞を使う。光高周波電子銃で 5MeV 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 35MV/m 1 台で加速することによって、40MeV の大強度電子ビームを衝突チャンバーへ輸送する。この小型線形加速器が最高性能で運転できた場合に 40MeV 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 1m 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。

以上の説明から大強度レーザーシステムへの要求は以下のように決めた。

1. レーザーパルスの繰り返しは 100MHz 以上の準連続運転。
2. レーザーパルスエネルギーは 10mJ 以上とし

Organization and Responsibility

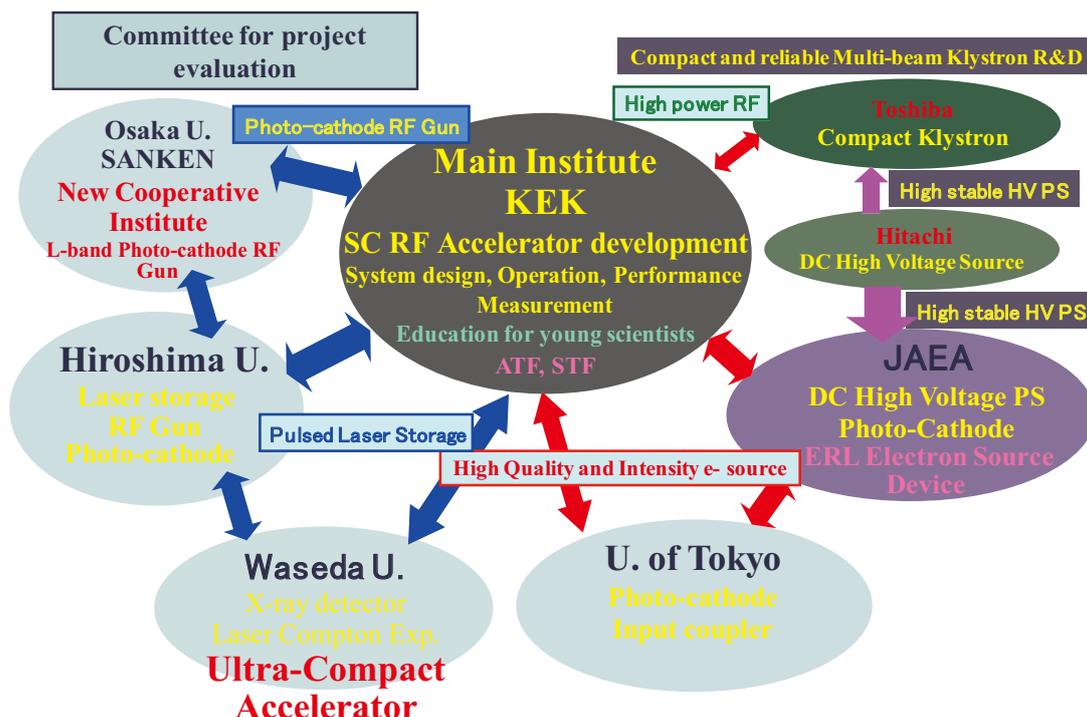


図 2 : 基盤技術の研究開発組織関連図

て、目標は 50mJ。

3. 衝突点でのレーザーサイズ $10\mu\text{m}(\sigma)$ 程度。

このレーザー平均パワーは 1MW 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 100kW 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開始した。既に、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く。国際特許の申請をしているので、ここでは詳しい説明を省く。

一方、レーザーサイズを $10\mu\text{m}(\sigma)$ 程度に絞り込むために、新しい 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ためには、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。これは光共振器への入射レーザーの位相を光共振器内の蓄積レーザーパルスの位相に合わせて、レーザー蓄積を実現するためである。現状では入射レーザーエネルギーの 1000 倍程度の蓄積が実現していて、衝突点でのレーザーサイズは $30\mu\text{m}(\sigma)$ になっている。この実績値は、2 枚ミラー光共振器で実現できたものである。新しい 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 10000 倍以上にして、レーザーサイズを $20\mu\text{m}(\sigma)$ 以下にできる可能性を持っている。現在、この装置のプロトタイプを作り、基本性能試験を行っている。また、フランスの開発協力グループが提案している 3 次元 4 枚ミラー光共振器装置を 2010 年夏ごろ 1.3GeV 電子蓄積リングに設置して、秋に 25MeV 高輝度ガンマ線生成実験を行う。図 3 にフランスの複雑な光共振器装置と我々のプロトタイプを示す。ビ

ームダクトは共振器のレーザー収束点を通る。また、衝突チャンバーの傍の光学架台（大気中）上にレーザー発生装置と制御インターフェースを設置することになる。

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、既に 1.5 cell S-band RF Photo-cathode Gun を使って $0.5\text{nC}/\text{bunch}$, 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進めている。電子バンチの規格化エミッタンスは 1mmrad 以下にする必要があるのでバンチ強度を $0.5\text{nC}/\text{bunch}$ 以下としている。今年の秋には 3000 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 8000 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 では ILC および 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。本プログラム用に実用的なパルス運転 30MV/m と CW 運転 20MV/m の 1.3GHz 9-cell super conducting cavity 製作技術開発をお願いした。現状は図 4 に示すように、製作した空洞の 25% がパルス運転で 30MV/m 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 台が実証実験に供給される計画である。

電子ビームとレーザーパルス $10\mu\text{m}(\text{rms})$ 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。そのために図 5 の S-band RF Gun と 3m S-band 加速管を使った常伝導高周波加速装置を使って、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

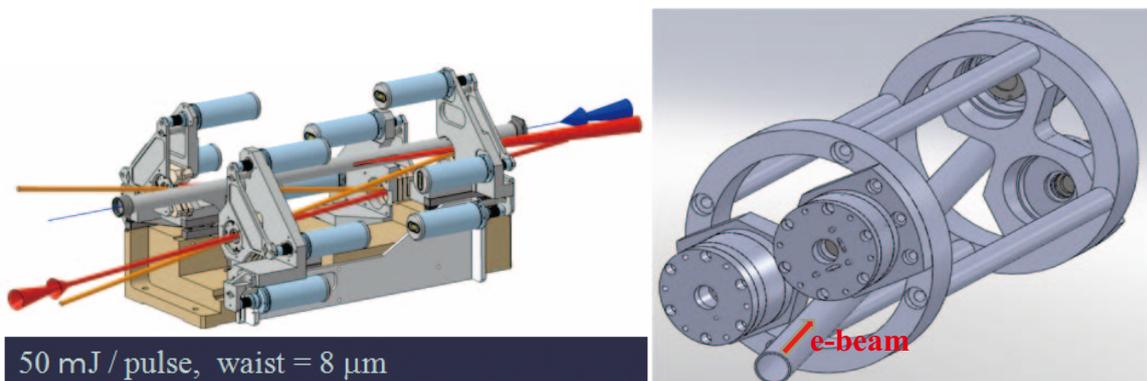


図3：フランスの複雑な光共振器装置と我々のプロトタイプ3次元4枚ミラー光共振器

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な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する。

今後の予定

レーザー蓄積装置の平均パワーを100kWから1000kW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図5の常伝導加速装置で行い、実用化のための技術蓄積を進める。さらに図6に示す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162.5MHzで1msec pulse長のマルチバンチ電子ビーム生成(162,500bunches/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0.1nC/bunchと仮定しても、16mA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。

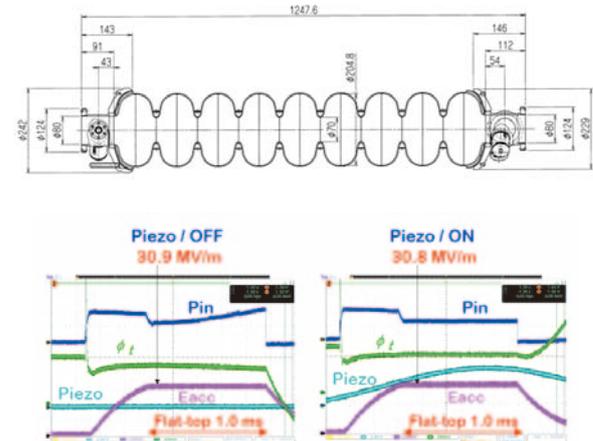


図4：パルス運転用1.3GHz超伝導空洞図面と性能試験結果

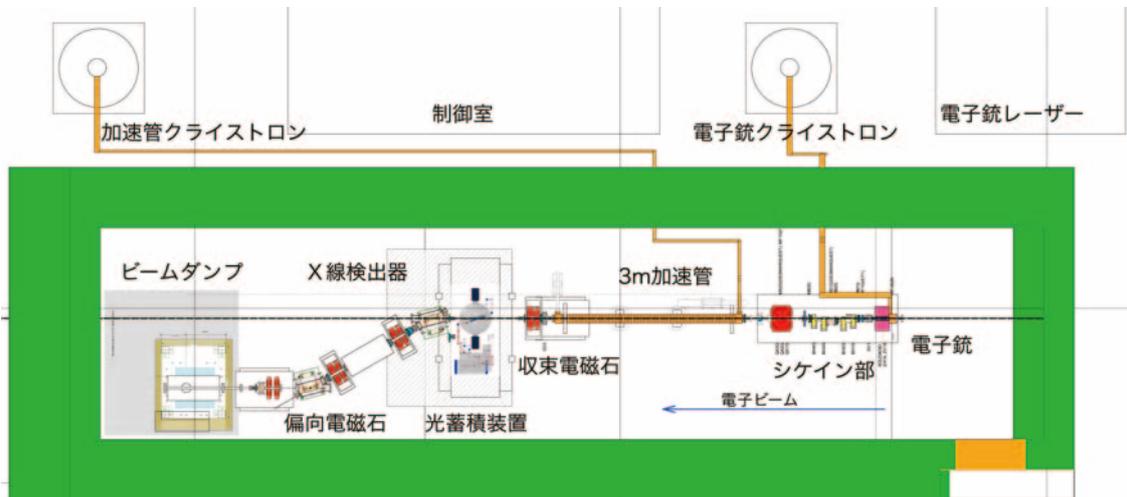


図5：常伝導加速器による総合基盤技術開発装置

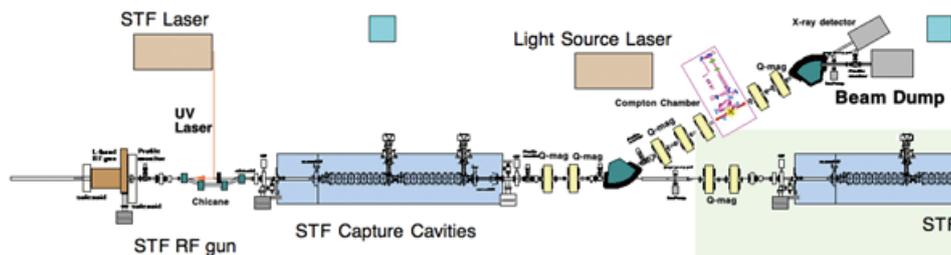


図6：超伝導加速器による最終実証実験装置

■ 500kV フォトカソード DC 電子銃の開発状況

超伝導加速による光子源において発生する光子（X線）の輝度、強度を増大するには、電子ビームを連続的に加速する運転モード（CW 運転）が望ましい。CW 運転を実現するには超伝導加速器、電子銃ともにパルス運転モードとは異なる性能の装置が必要であるため、本プロジェクトでは、CW 運転用の超伝導加速空洞、電子銃の開発が行われている。本稿では、原子力機構（JAEA）グループが分担している CW 運転用の低エミッタンス大電流電子銃の開発状況を報告する。

われわれは、CW 運転を実現する低エミッタンス大電流電子銃として、半導体光陰極を備えた DC 電子銃（フォトカソード DC 電子銃）を採用し、開発を進めている。このタイプの電子銃を採用した理由は次の通りである。(1) フォトカソードはレーザーを半導体に照射して光電子を発生するもので、モードロックレーザーからピコ秒の電子パルス列を直接生成し超伝導加速器へ入射できる。同時に低エミッタンス電子ビームの生成にも適している。(2) RF 電子銃（常伝導）では RF 空洞の発熱のために CW 運転が困難であるが、DC 電子銃は容易に CW 運転を行うことができ、また DC 電源の容量次第で大電流にも対応可能である。

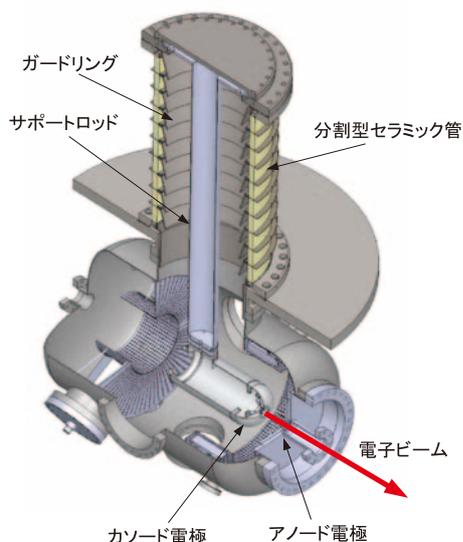


図7： 500kV フォトカソードDC電子銃の構成。絶縁用のセラミック管の上端に負電位 (-500kV) を印加する。カソード電極の正面にフォトカソードが装着され、前方から照射されるレーザーによって光電子を発生し、アノード電極側に引き出される。

図7に開発中のフォトカソード DC 電子銃の構成を示す。空間電荷効果による電子ビームエミッタンスの増大を抑止するためには、電子を高電界、高電圧で引き出す、すなわち、カソードとアノードの間隔を短くする必要がある。このような理由により、絶縁セラミック管を貫通するサポートロッドを使ってカソードを真空チェンバーの中央に設置している。サポートロッドはフォトカソード DC 電子銃に特有の構造であり、一般的な DC 加速管（イオン加速器など）には存在しない。

低エミッタンス大電流ビームの発生を目指したフォトカソード DC 電子銃は、自由電子レーザー (FEL) やエネルギー回収型リニアック (ERL) を目的として、これまで研究が行われてきたが、350kV の運転実績（米国ジェファーソン研）が最大電圧であった。高電圧化を阻む最大の障害は、サポートロッドからの電界放出電子がセラミック管を破損する現象である。図8（左）に示すように従来型のセラミック管ではサポートロッドから放出された電子がセラミック管の内表面に直接到達する。この時、局所的に電子が集中すると放電によってセラミックが割れる（クラック）または貫通孔が開く（パンチスルー）ことによりセラミック管が使用不能になってしまう。

われわれは、電界放出電子によるセラミック管の破損が生じないように、ガードリング付きの分割セラミック管を採用し、最適設計を行った。このような構造を用いることにより、サポートロッド

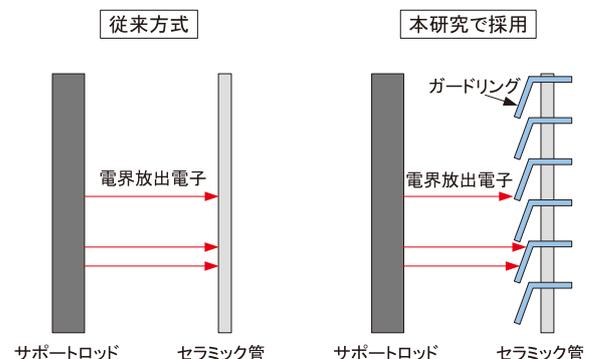


図8： 従来方式のセラミック管と本研究で採用したセラミック管。従来方式では電界放出電子がセラミック内表面に到達しセラミックの破損を生じた。本研究では分割セラミック管とガードリングを組み合わせることにより、電界放出電子によるセラミックの破損を防ぐ構造とした。

からの電界放出電子がセラミック管に到達することがなくなる（図8（右））。設計では、500kVの電圧を印加した時に、サポートロッドとガードリングの表面電界が10MV/m以下になるように、セラミックの口径、長さ、分割数、ガードリングの形状を決定した。なお、過去に同様の分割セラミック管がJAEAのFEL用熱陰極電子銃(250kV)、名古屋大学の偏極電子源(200kV)に採用され、良好な実績があったことも、本方式を採用した根拠のひとつであった。図9に今回製作した分割セラミック管とJAEA-FELのセラミック管を示す。

製作した分割セラミック管にガードリングを装着し、サポートロッドなし、サポートロッドありの構成で、それぞれ高電圧印加試験を行った。サポートロッドなしでは3時間程度で、サポートロッドありでは110時間程度のコンディショニングを経て定格電圧の印加に至った。光子源のユーザー運転を想定した8時間連続の電圧印加試験も無放電でクリアし、世界最高電圧のフォトカソードDC電子銃が完成した。まもなくビーム引き出し試験を開始する予定である。



図9：500kV フォトカソード DC 電子銃用に製作した分割セラミック管（左）と、JAEA-FEL で使用した 250kV 熱電子銃の分割セラミック管（右）。500kV セラミック管の大きさは、直径 400mm、高さ 750mm である。

Acknowledgments

This News is supported by Quantum Beam Technology Program of the Ministry of Education, Science, Sports, Culture and Technology of Japan (MEXT).

量子ビーム基盤技術開発プログラム（2008-2012 年度）

Quantum Beam Technology Program supported by MEXT

次世代ビーム技術開発課題「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」（拠点責任者：浦川順治）
Development for Next Generation Compact High Brightness X-ray Source using Super Conducting RF Acceleration Technique



大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)
High Energy Accelerator Research Organization
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1 TEL 029(879)6248