# 平成20年度成果報告書

# 委託業務成果報告書

量子ビーム基盤技術開発プログラム 「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」

平成21年7月28日

高エネルギー加速器研究機構 量子ビーム次世代ビーム技術開発グループ編集

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業によ る委託業務として、高エネルギー加速器研究機構が幹事機関 として実施した平成20年度「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」の成果を取りまとめたものです。 参画機関の成果も含みます。

1.	委託事業の目的・・・・・	• 1
2.	平成 20 年度の事業計画	• 1
3.	実施体制と役割分担・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	• 4
4.	委員会	• 5
5.	平成20年度研究成果報告	
	A. 新フォトカソード開発 東大、上坂研	• 6
	B. カソード、RF Gun 開発 広大、栗木研 大強度高品質電子源開発	12
	C. 高圧 DC Gun 開発と入射部超伝導空洞開発 原機構、羽島グループ C-1. 直流高圧電子源のための高電圧発生装置の開発 C-2. 直流高圧電子源組み合わせて使用する CW 超伝導加速空洞の研究開発	16
	D. パルスレーザ蓄積装置開発 広大、高橋研	27
	E. パルス超伝導空洞開発 KEK、早野グループ	31
	F. CW 超伝導空洞開発 KEK、古屋グループ CW 超伝導加速空洞技術の開発	36
	<ul><li>G. X 線検出装置の実用化開発 KEK、幅グループ</li><li>X 線検出装置の実用化開発</li></ul>	42
	H. 高周波超伝導空洞用入力カプラーのためのセラミック窓の開発 東大、中村研	48
	I. X 線測定および利用研究 早稲田、鷲尾研 X 線測定および利用研究	57
	J. 電子ビーム・レーザ衝突技術の開発(システム統合化)と プロジェクトの総合的推進 KEK、浦川グループ 電子ビーム・レーザ衝突技術の開発とプロジェクトの総合的推進	65

目

次

# 1. 委託業務の目的

超伝導高周波加速器技術とレーザ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、レーザ光路精密調整といった技術の実用化を図る。よって、超 伝導高周波加速器技術を使った5 nm~0.025 nm 波長領域の小型高輝度X線 発生装置の開発とその実用化に必要な基幹技術の確立を行うことを目的と する。

このため、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構、国立大 学法人東京大学、独立行政法人日本原子力研究開発機構、国立大学法人広島 大学、学校法人早稲田大学、東芝電子管デバイス株式会社及び株式会社日立 ハイテクノロジーズと共同で業務を行う。

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構では、超伝導加速空 洞開発および小型高輝度光子ビーム源装置に関するシステム統合化研究開 発を実施する。

# 2. 平成20年度の事業計画

A. 新フォトカソード開発

高周波電子銃で動作できる高効率高寿命カソード開発のために、本年度は カートリッジ交換システムの開発を行う。カートリッジ交換システムは酸素 や水分に弱いカソードを高真空内で交換できる機構である。可視光で駆動可 能なアンチモンを用いたマルチアルカリカソードの設計と試作を行い、効 率並びに寿命を詳細に検討する。

## B. 大強度高品質電子源の開発

KEK、原子力機構、東大などと共同で大強度高品質電子源の開発に取り 組む。広島大学では特にカソード評価装置の高度化により、多くのサンプル について表面処理や活性化の条件などによる陰極の系統的な研究を行う。ま た、RF電子銃による大強度高品質電子ビーム発生のため、既存のRF電子銃 の長パルス化に取り組むとともに、その研究をもとに長パルス運転のための RF電子銃空洞の最適化設計に着手する。

### C. 高圧 DC Gun 開発と入射部超伝導空洞開発

C-1. 直流高圧電子源のための高電圧発生装置の開発

高輝度光子ビーム源の連続運転のための直流高圧電子源の開発に着手する。本年度は、直流高圧電子源を構成する主要な要素である、コッククロフト・ウォルトン型高電圧発生装置の設計と試作を行う。

C-2. 直流高圧電子源と組み合わせて使用する CW 超伝導加速空洞の研究開発

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構と連携して、直流高圧 電子源と組み合わせて使用する CW 超伝導加速空洞の最適設計を行い、次年 度以降に予定している空洞試作の準備を整える。

## D. レーザ蓄積装置の開発

KEKにおける光子ビーム生成のための、レーザ蓄積装置の設計に着手する。特に4枚鏡からなるリング型蓄積装置を念頭においたデジタルフィード バックシステムの構築方法を検討する。この目的のため、試験用小型レーザ システムを広島大学に構築することを目標とする。

## E. パルス超伝導加速空洞技術の開発

パルス運転用超伝導加速空洞製作技術を高度化するために、表面処理条件 を工夫した超伝導空洞を試作して、その性能測定を系統的に行うことによっ て、高性能超伝導空洞製作が行える条件を調べる。このために超伝導空洞の 内表面を高精度で検査できる装置や清浄な製作環境を保つ装置等を開発す る必要がある。この空洞製作技術の系統的な開発研究を3年程度行うことに よって、パルス超伝導加速空洞の製品化の見通しを得るのが目的であるが、 初年度は表面処理方法に関する知見を得て、次年度から製作コスト削減方法 の検討資料を作成することになる。

#### F. CW超伝導加速空洞技術の開発

CW超伝導加速空洞製作技術を高度化するために、CW運転に合わせた条件で 超伝導空洞を試作して、その性能測定を系統的に行うことによって、高性能 超伝導空洞製作が行える条件を調べる。このために超伝導空洞の内表面を高 精度で検査できる装置や清浄な製作環境を保つ装置等を開発する必要があ る。この空洞製作技術の系統的な開発研究を数年程度行うことによって、CW 超伝導加速空洞の製品化の見通しを得るのが目的であるが、本年度はプロ ットタイプ1台の試作により、製造技術の具体的な検討を行う。また、日 本原子力研究開発機構と連携して、直流高圧電子源と組み合わせて使用す るCW超伝導加速空洞の最適設計を行い、次年度以降に予定している空洞試 作の準備を整える。

### G. X線検出装置の実用化開発

軟X線から硬X線検出装置の評価を行い、本課題装置に利用する場合の問題 点を抽出する。X線検出装置を試作して、X線測定実験を行い、どのような測 定上の問題があるかを整理する。

### H. 高周波超伝導空洞用入力カプラーのためのセラミック窓の開発

高周波超伝導空洞用入力カプラーにおけるセラミック窓は、超伝導空洞 内の超高真空と大気とを分けることはもちろんのこと、超伝導空洞内の性 能を劣化させる粉塵混入の抑制や機械的にカプラー本体を支える役目と して非常に重要なコンポーネントの一つであるが、大電力パワー投入下で はセラミック窓からの発熱や劣化などが問題となる。特に極低温下の超伝 導空洞への入熱を抑え、なおかつ安定に電力を供給することが入力カプラ ーの開発としては必須である。本年度の主な目標は、大電力パワー入力状 態においてセラミック窓の発熱を軽減することとセラミック窓の表面で の放電を抑えることを実験的に検討することにある。大電力投入下にてセ ラミック窓の性能評価試験を行うとともに、放電、発熱等に関して問題点 を抽出する。入力カプラーはクライオモジュール内の真空中にて設置され ることとなるため、セラミック窓等は断熱槽で覆い、なおかつ低温状態を 保持することが重要であり、最終的にはその状況下におけるセラミック窓 の基本性能を評価する。

## I. X線の検出装置(時間分解及び空間分解)の設計及び試作を実施する。

具体的には、比較的低エネルギーのX線の計測システムを開発するための 基礎的な検討と、実験的な検証を実施する。

ー方スペクトロメータ開発の一環で、汎用性の高いブラッグ反射を利用した システムの予備的な試験を実施する。

これらの結果を元に、次年度以降に実施するエネルギー分割測定に必要な X線のフラックスの下限値の確認を行うとともにエネルギー分解能等の評価 方法について検討する。

- I-1. X線検出システムの設計
- I-2. 試作装置の作製

I-3. 検出試験

# J. 電子ビーム・レーザ衝突技術の開発(システム統合化)とプロジェク トの総合的推進

J-1. 高周波電子源を使って、今までの300nC/300nsec電子ビーム生成実績を 向上するために、電子源の設計を行う。また、5MeV大強度電子ビームとレー ザパルスを高繰り返しで衝突させて、レーザ逆コンプトン散乱で軟X線生成 実験を行えるように、放射線管理区域内に実験場所を整備する。3年間の電 子ビーム・レーザ衝突実験によって、本提案課題装置で将来必要となる安 全システム・制御システム等の技術蓄積を行う予定である。

J-2. プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、研究 開発運営委員会や技術検討会の開催等、参画各機関の連携・調整にあたる。 特に、プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ計画の合理化を検討し、必 要に応じて調査或いは外部有識者を招聘して意見を聞くなど、プロジェクト の推進に資する。

プロジェクトで得られた成果については、積極的に公表し、今後の展開に資する。

# 3. 実施体制と役割分担

業務主任者

役職・氏名 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設教授 浦川 順治 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構では、超伝導加速空洞開発および 小型高輝度光子ビーム源装置に関するシステム統合化研究開発を実施する。

業務項目	実施場所	担 当 責 任 者
①-A パルス超伝導加速 空洞技術の開発	つくば市大穂1-1 高エネルギー加速器研究 機構	加速器研究施設准教授 早野 仁司
①-B CW超伝導加速空洞技 術の開発	超伝導リニアック試験棟 (STF) 東カウンターホール	加速器研究施設教授 古屋 貴章
②電子ビーム・レーザ衝突技術の開発(システム 統合化)	つくば市大穂1-1 高エネルギー加速器研究 機構先端加速器試験棟 (ATF)	加速器研究施設助教 照沼 信浩
③X線検出装置の実用化 開発	つくば市大穂1-1 高エネルギー加速器研究 機構先端加速器試験棟 (ATF)	素粒子原子核研究所教授 幅 淳二
④プロジェクトの総合的 推進	つくば市大穂1-1 高エネルギー加速器研究 機構2号館4階次世代量 子ビームプロジェクト推 進室	加速器研究施設教授 浦川 順治

国立大学法人東京大学では、小型高輝度光子ビーム源装置の新フォトカソード開発及 び高周波超伝導空洞用入カカプラーの開発を実施する。

業	務項	目	実	施	場	所		担	当	責	任	者
<ol> <li>新フ</li> <li>発</li> </ol>	ォトカソー	·ド開	茨城県那 白根2-22 工学系研	3珂郡 2 「究科	東海 ·原子	时白 ·力専	方 攻	工学系 教授	研究 <sup>。</sup> 上坂	科原- 充	子力『	專攻
② 高周 池 カ プ ラ マ ク 窓	反超伝導空浴 一のための この開発	同用入 のセラ	千葉県柏 - 5 東京大学	1市柏 学物性	の葉 研究	5- 所	1	物性研 准教授	究所 中 <sup>;</sup>	村典加	雄	

国立大学法人広島大学では、レーザ蓄積装置および大強度高品質電子源に関わる研 究開発を実施する。

業務項目	実 施 場 所	担当責任者
①レーザ蓄積装置の開発	東広島市鏡山1-3-1 広島大学大学院先端物質 科学研究科	大学院先端物質科学研究 科・准教授 高橋 徹
②大強度高品質電子源の 開発	東広島市鏡山1-3-1 広島大学大学院先端物質 科学研究科	大学院先端物質科学研究 科・准教授 栗木雅夫

独立行政法人日本原子力研究開発機構では、直流高圧電子源に関わる研究開発を実施 する。また、直流高圧電子源と組み合わせて使用する CW 超伝導加速空洞について、大 学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構と連携して研究開発を実施する。

研究項目	担当機関等	研究担当者
1. 直流高圧電子源開発	日本原子力研究開発機構	羽島良一
(1) 直流高圧電子源の	日本原子力研究開発機構	永井良治
ための高電圧発生装置	日本原子力研究開発機構	西森信行
の開発	日本原子力研究開発機構	飯島北斗
(2) 直流高圧電子源と	日本原子力研究開発機構	沢村勝
組み合わせて使用する		
CW 超伝導加速空洞の研		
究開発		

学校法人早稲田大学では、X線発生総合試験において、次の項目について、高い精度でX線のエネルギー及び角度分布等の計測を可能とする以下のシステムの開発を 実施する。

①汎用ブラッグ反射を用いたスペクトロメータシステム開発 ②高分解能半導体 X 線スペクトロメータ

③円筒面多層膜ミラーと二次元位置検出器を組み合わせた2次元スペクトロメータ

業 務	項	Ħ	実施場所 担当責任者	
X線検出器の	)開発		東京都新宿区大久保3丁目 理工学術院教授・鷲尾方- 4番1号 学校法人 早稲田大学	_

# 4. 委員会

# 運営委員会等の活動

研究開発運営委員会 2008 年 11 月 4 日 第一回量子ビーム研究開発運営委員会 KEK2 号館中会議室 2009 年 3 月 19 日 第一回量子ビーム成果報告会 KEK2 号館 406 号室 技術検討会等8回 2008.08.20 第一回 X 線検出検討会 KEK3 号館 425 号室 2008.10.10 第1回光高周波電子銃打ち合わせ KEK3 号館 725 号室 第2回光高周波電子銃打ち合わせ KEK3 号館 725 号室 2008.12.12 2009.2.24 第3回光高周波電子銃打ち合わせ KEK3 号館 725 号室 第4回光高周波電子銃打ち合わせ KEK3 号館 725 号室 2009. 3. 24 超伝導空洞およびクライオの量子ビーム打ち合わせ KEK2 号 2009.02.26 館 406 号室 2009.03.16 量子ビーム 1.3GHz 高周波源の打ち合わせ KEK2 号館 406 号室 2009.01.22-23 広島大学高輝度電子源検討会 広島大学東広島キャンパス、

先端物質科学研究科 302S 室

# 5. 平成20年度研究成果報告

A. 新フォトカソード:可視光カソード試運転

1. 本研究の背景

フォトカソード高周波(RF)電子銃は、サブピコ秒からフェムト秒の超短パル スかつ低エミッタンスの電子ビーム発生が可能である。このビームを用いて、 短時間現象解明のためのポンプ&プローブ実験用の電子銃として利用している。 これはポンプである電子ビーム発生用のレーザとプローブのレーザで同じ光源 を用いることにより、高精度の同期が可能となるからである。

東京大学原子力専攻のライナック施設に設置されている S-band の 18MeV Linac (18L)では、サブピコ秒からフェムト秒時間領域の現象、特に放射線誘起 反応初期過程の解明を目的としたポンプ&プローブ方式の高時間分解能パルス ラジオリシスシステムが構築されており、フォトカソード RF 電子銃が使用され ている[1], [2]。

フォトカソード RF 電子銃は、駆動レーザを共振空洞内のカソード面に入射して 光電子を発生させ、それを高周波電場(RF)で加速して電子ビームを発生させ る。

フォトカソード RF 電子銃を用いたパルスラジオリシス用の 18L の体系図を図 1 に示す。18L は主に、フォトカソード RF 電子銃(1.6 cell BNL-GUN -IV)、 加速管、Q マグネット、シケイン型磁気パルス圧縮器からなる。また、フォトカ ソード励起用レーザ及びプローブ用レーザの光源は、0.3TW の Ti:Sapphire フェ ムト秒レーザを使用しており、途中スプリッターで 2 つに分けている。RF 電子 銃には三倍高調波(266nm)に変換して入射している。18L のパルスラジオリシス





図2 カートリッジ式カソード交換システム概略図



図3 カートリッジ式交換システム

実験では、超短パルス電子ビーム、高精度同期システム、大電荷量ビームの3 つが高時間分解能のため要求される。現在、それぞれの課題について研究が行 われている[4]。

Cs<sub>2</sub>Te などの高 QE カソードは、カソード生成時から電子銃へのインストール

時まで一貫して超高真空に保つ 必要がある。今回 18L に導入す るカートリッジ式のシステム (SPring-8、浜松ホトニクス、東 大)は、工場で生産されたカート リッジ管内にカソードが真空封 じされているため、製膜装置な しで高 QE カソードの使用が可 能であり、コンパクトである。 SPring-8 でこのシステムによる 単セル RF 電子銃でのビーム試 験が行われており、Cs<sub>2</sub>Te の QE 測定が行われた [5], [6]。

今回の導入では、RF電子銃の 後ろのスペースが十分ではない ため、Spring-8で使用されてい るものよりさらに小型(50-80cm 程度)のシステムが要求される。 図2に今回導入するカートリッ ジ式カソード交換システムの概 略図を示す[7]。このシステムは、 カソード交換可能なRF電子銃端 板、カソード交換装置、及びカ



ートリッジ管から成る。Spring-8との違いはカートリッジ管を保管しておくリ ボルバーがない点である。カソード交換可能なRF電子銃端板とは、通常の端板 にプラグ挿入用の孔を開けたものである。カソード交換装置、及びカートリッ ジ管の写真を図3に示す。カソード交換機構はカートリッジ管をフィードスルー 後方にセットしベーキングの後、ゲートバルブを開け、カートリッジ管をフィ ードスルーで移動させてカソード端板近傍までインストールする。その際カソ ードを真空に保護しているコバール膜を破る。カソード近傍にセットした後、 内側のフィードスルーを動かすことによってカソードを端板の位置まで移動さ せる。カソードの真空度を確認するため端板後方に真空計を設置している。

## 2. Na<sub>2</sub>KSb カソード

3 倍高調波の変換効率は本施設では2%程度であり、装置の大型化、それに伴う不安定化を招いている。装置を小型・安定化するために2倍高調波(400nm) で動作可能なカソードの試験が望まれる。

Na<sub>2</sub>KSbは光電子増倍管で使われているカソードであり、400nmで最大の量子効率を誇る。取り出すために必要なエネルギーは2.0eVで、Cs<sub>2</sub>Teの3.5eVよりも大分小さく、Cs<sub>2</sub>Sbの仕事関数2.4eVより低く(2.0eV)、そのため量子効率を更に稼ぐことが可能となる。またCsをフリーにすることにより、Cs蒸発による量子



図 5 266nm における RF 電子銃で加速した電子ビーム の電荷量

効率劣化が少なくなり、長寿命化が期待できうる。図4にカソードの量子効率の波長依存性を示す。このカソード材質をカソードのモリブデンベース上に生成し、フォトカソードRF電子銃にインストールし試験を行った。試験では266nmの波長で寿命テストまで行った。

RFのパルス幅は2µsで10Hz運転した。カソードは最初低いワット数からエージングを開始し、序序に印加電圧を上げて最終的に7.5MWをRF電子銃に印加する。 カソードのエージングには約半日を要した。



エージングののち量子効率が1%であった。結果を図5に示す。このカソードの

寿命特性は、周りの真空度に強く依存 し、通常イオンポンプにおいて 2<sup>~</sup>4\*10<sup>-9</sup>Torrの真空度で行ったが、RF ガンの放電で真空度がたびたび 3\*10<sup>-8</sup>Torr以下になることもあった。初 期のオフラインにおけるカソード量子 効率試験4%よりも小さかったが、これ はこの量子効率ですでに1.8nCも出て おり、空間電荷制限を受けてしまった からであると推測される。最大電荷は 4.5nCであり、大電流においても使用で きうることがわかった。

続いて寿命特性試験を行った。加速器 の電子源として使用していく場合、カ ソードの寿命が問題となってくる。寿 命が短いカソードでは電流量の不安定 性、メンテナンス回数の増大が見込ま れ、使用に不都合が生じる。

我々の装置の真空度は真空ポンプ付 近で2\*10<sup>-9</sup>Torr、端板後方のカソード挿 入口で2\*10<sup>-8</sup>Torrであった。RFガンキャ ビティは奥まった構造をしており、それ より真空度が悪いのが見込まれる。カソ ードプラグ挿入後多数の放電が観測さ れ、イオンポンプにおいて4\*10<sup>-8</sup>Torr以 下に落ちることも多数あった。そのよ うな真空度におけるNa,KSbカソードの 寿命特性を図6に示す。カソードの寿 命が24時間以内で急激におち0.5%まで 減衰する時間は100時間であった。その 後量子効率の落ちが減速し、280時間後 に当初の1/5の量子効率(T(1/5))に到 達、その後安定した。図6にRFの印加 時も示す。加速器を止めた3日間での劣 化が特に激しく、RF印加によるものだ けではないことがわかる。図7にRF印 加後のNa,KSbカソード表面を示す。カソ ード全面に放電痕が観測され、特にエ ッジ付近に多い。中心付近の拡大図で も多数の放電痕が見られる。長寿命の カソード開発にはRF放電にも耐えられ



図7 RF 印加後の Na<sub>2</sub>KSb カソード 表面の顕微鏡写真



図8 Na2KSb カソード生成チェンバー

るぐらい積層する必要があると考えられる。

## 3. 平成21年度の予定

可視光が駆動することが可能であるNa2KSbのRF電子銃内での試運転も成功し、 紫外光の波長であるが、100時間以上の稼動が見られた。

平成21年度はメインの可視域の400nm帯試験を行い、可視光でも駆動できること を示す予定である。また脆化の主原因を探るため、酸素や水分被爆を行い劣化 のメカニズムを調べる予定である。

また500nm帯でも動作が可能である(Cs)Na2KSb(S-20)の開発やTeを表層につけた耐酸素カソードの開発も日本原子力研究開発機構と共に行っていく予定である。図8に原機構のチェンバーを示す。

### 4. 学会での報告

神戸浩多、三好邦博、作美明、上田徹、上坂充、「東大フォトカソードRF電子 銃の熱問題」、 第6回高周波電子銃学会、京都大学、2008.11.

作美明、神戸浩多、三好邦博、上田徹、上坂充、「Photocathode RF gun with bi-alkali high QE cathode」、ビーム物理研究会、Spring-8、2008.11.

三好邦博、神戸浩多、作美明、上田徹、上坂充、「マルチアルカリ光電陰極に おける暗電流低減のための加速電場強度の最適化」、日本物理学会第64会年 次大会、立教大学、2009. 3.

三好邦博、神戸浩多、作美明、上田徹、上坂充、「東京大学におけるマルチア ルカリ光電陰極試験と暗電流低減のための加速電場強度の最適化」、日本原子 力学会2009春の年会 学生ポスターセッション、東京工業大学、2009.3.

神戸浩多、三好邦博、作美明、上田徹、上坂充、「Sバンドカートリッジ型フ オトカソードRFガンの電磁熱設計」、日本原子力学会2009春の年会、東京工業 大学、2009.3.

### 5. 参考文献

- [1] M. Uesaka et al., Radi. Phys. Chem, 60 (2001)
- [2] Y. Muroya et al., Nucl. Instr .Meth. A, 489 (2002)
- [3] H. Iijima, et al., Proc. 2002 EPAC 1771-1773
- [4] A. Sakumi, et al., Proc. 2005 PAC 3079-3081
- [5] J. Sasabe et al., Nucl. Instr. Meth. A, 528 (2004)
- [6] H.Dewa et al., Proc. of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2003
- [7] A. Sakumi, et al, Particle Accelerator Conference(PAC) 2007, proceedings, 2787 (2007).

# B. 大強度高品質電子源開発 Development of High Brightness Electron Source

概要

超伝導高周波加速技術を使った5nm~0.025nm 波長領域の小型高輝度X 線発 生装置の開発とその実用化に必要な基盤技術の確立を行うことが目的である。 小型X 線発生装置ができれば大型放射光発生装置で行っているポストゲノム時 代の生命科学研究、超精密マイクロリソグラフィ、ナノ超微細構造研究等が研 究室レベルで行うことができる。目標は軟X 線(250eV)から硬X 線(50keV)まで の高品質光子ビーム生成について、10<sup>17</sup>photon/sec.mrad<sup>2</sup>.mm<sup>2</sup>.0.1%bw 以上のピ ーク輝度を小型装置で開発することである。本課題では本装置に必要な電子源 として、光陰極RF 電子銃およびDC 電子銃用カソードの高度化を目指す。 Abstract

Our aim is to develop a compact X-ray source covering 5nm-0.025nm region in wavelength and establish key components and technologies for the system. A wide variety of researches on biotechnology and science in post-genome era, super-high resolution micro-lithography, and sciences on nano-super-fine structure, which are currently studied in huge facilities like 3rd-generation light source, can be promoted by this compact X-ray source in a small laboratory. It is our final goal to achieve the peak brightness of more than  $10^{17}$  photon/sec·mrad<sup>2</sup>·mm<sup>2</sup>·0.1% bw from 250eV to 50keV in energy by the compact X-ray source. In this work package, we focus on R&D of high intensity electron source based on photo-cathode RF gun and photo-cathode DC gun.

X 線は医療、生命科学、材料科学など広い分野で利用されている。研究の進展は発生するX 線の輝度、時間構造、スペクトラムなどに制限されており、研究の裾野を広げるためにも小型でかつ高輝度X 線発生が可能な装置が望まれる。本研究は電子ビームとレーザとのコンプトン散乱により、短パルスでかつ準単色X 線を幅広い波長領域で発生可能な小型システム開発をめざすものである。本課題ではそのうち、システムで重要な役割を果たす電子源である光電陰極RF電子銃およびDC電子銃開発を行う。システム全体の運転モードとしてパルスモード(パルス長1ms、繰返し5Hz)とCW モード(連続運転)が仮定されている。電子ビームの平均電流において、CW モードはパルスモードに比べ600 倍程度と優位であるが、技術的にはより挑戦的であり、各々の運転モードにおける実証を段階的に行って行く予定である。RF 電子銃とDC 電子銃は各々パルスモードとCW モードに最適な電子銃であり、段階的に開発および実証を行う。

## 2. 光電陰極RF 電子銃開発

本課題では加速高周波との同期をとり、かつ1ms という長いパルスでの運転 を考慮し、駆動周波数としてL-band(1.3GHz)を選択した。現在、KEK、FNAL(Fermi National Laboratory,米国)、大阪大学、広島大学が共同して、1.3GHz のL-band RF電子銃開発を進めている。2008 年度内には電子銃空洞および周波数調整のテ スト空洞が完成する。また、フォトカソードにはKEK-ATF 等の施設において S-band RF 電子銃での実績を有するCsTe 陰極を用いる予定にしており、カソー ド準備真空チャンバー、真空輸送系、ロードロックシステムなどは来年度以降 に製作予定である。また電子ビーム発生用のレーザシステムについては、KEK、 JINR(Joint Institute for Nuclear Research, ロシア)、IAP(Institute for Applied Physics, ロシア),大阪大学、広島大学が共同で開発をすすめており、 今年度に発振器部が、来年度にアンプ部を含むシステム全体が完成する予定で ある。

表1 はL-Band RF 電子銃および関連するコンポーネントについての設計値を まとめたものである。レーザにはYb fiberレーザオシレーターを用い、162.5MHz でのモードロック動作によりパルス列を生成する。このパルス列をNd: YLF ア ンプによりパルス内平均パワー40W まで増幅し、さらに非線型結晶により四倍 高調波へと変換し、CsTe の光電効果に必要な266nm のUV 光を得る。CsTe 陰極 の量子効率を0.5%以上と仮定すれば、バンチあたり50pC、平均ビーム電流8mAが 得られる。 RF 電子銃空洞はシャントインピーダンス R=1.03E+7Ω であり、4MW の RF 入力で電子ビームを6.4MeV まで加速することが可能である。

コンポーネント	設計値
Yb fiber oscillator	162.5MHz, 62pJ, 10mW
Nd:YLF Amplifier	162.5MHz, 250nJ, 40.1W(Gain 4000)
高調波発生部	162.5MHz, 50nJ, 8.1W
L-band RF Gun	1.3GHz, R/Q=515Ω, Q=20000
CsTe cathode	量子効率1%以上
電子ビーム	162.5MHz, 100pC
パルス構造	1ms パルス長、5Hz 繰返し

表1. L-band RF 電子銃のコンポーネントと設計値

#### 3. D C 電子銃開発

RF 電子銃は常伝導高周波空洞内で電子ビームを発生させるため、大電流の電 子ビームをパルス的に発生させ、同時に高い電場で加速することができる優れ たデバイスである。しかし常伝導RF 空洞を高電界で連続運転することは困難で あり、準連続的にビーム発生させることはできない。一方、DC 電子銃は加速電 界は限られているが、準連続的にビームを発生できることから、稼働率の上昇 により、実質的な平均輝度の上昇がみこめる。

本課題ではKEK、原子力機構、名古屋大学、東京大学、広島大学などが共同で、 500kV というかつてない高電圧でDC 的に100mA という大電流ビームを取り出 す電子銃を最終目標として開発をすすめている。500kV 電子銃のための絶縁セ ラミック、放電およびそれによる損傷防止のためのガードリング電極、カソー ドサポートロッド、GaAs 陰極準備室や電子銃本体部などの極高真空容器などを 開発し、すでに多くのコンポーネントを製作した。来年度はこれらを組み上げ、 真空試験、高電圧印加試験、カソード活性化試験、ビーム試験などを予定して いる。

また、広島大学においてはカソードテスト装置を用いて、 GaAs カソードの 活性化および寿命試験を開始した。現在のところ、ベース真空度は1E-8Pa 程度、 HeNe レーザ(波長633nm)を用いて、活性化直後の量子効率10%程度を得ている。 また10-40mW のレーザパワーでビームを引きだし、100 時間以下のカソード運 転寿命を得ている。また独自に極高真空の実証と、それをもちいた長寿命カソ ード実証試験のために、化学研磨処理チタンチャンバー、チタン容器クライオ ポンプなどを製作した。来年度はこれらを組み上げ、さらに必要なカソード活 性化チャンバーを製作して、長寿命カソード開発を行う。

表2 は500kV DC 電子銃およびコンポーネントの必要性能をしめしたものである。DC電子銃においては運転は電子ビームおよびレーザパルスが途切れることなく続く準連続モードであるので、稼働率はおよそ200 倍となる。また平均電流もおよそ3 倍となっており、電子ビームだけからみればRF 電子銃の場合に比べて600 倍の向上が見込める。

	設計値
光カソードの量子効率GaAs	1%
レーザ	780nm, 162.5MHz, 46nJ, 7.5W
加速電圧	500kV
電子ビーム	162.5MHz, 300pC
バンチ幅(psec(r.m.s.))	10
バンチ間隔	6.15ns
平均電流	50mA

表2. 500kV DC 電子銃の設計値

図2 にカソードテスト装置で得られた、GaAs 活性化の例をしめす。GaAs の バルク結晶の仕事関数は4.9eV であり、そのままでは光電効果を生じさせるの に真空紫外の光が必要であるが、表面修飾によりNEA(Negative Electron Affinity)状態をつくることで、可視光での電子発生が生じる。NEA 表面から の光電子発生においては、価電子帯から伝導バンド底へ励起された電子の真空 への取り出しが可能となり、 価電子帯の最高バンドからの選択的励起をさせる ことで偏極電子ビームの生成や、熱化による超低エミッタンス生成など、高性 能電子ビーム生成ができる。本テストではバルクGaAs 結晶を使用し、



図2. GaAs カソードのNEA 活性化の例。縦軸は量子効率、横軸は時間(秒)を表す。

乾燥窒素中での化学洗浄による表面酸化膜の除去とAs リッチ面の生成、極高真 空中での加熱洗浄によるGaA 清浄面の作成、Cs と酸素の添加によるNEA 活性化 をおこなった。図2 は光源にHeNe レーザを用いて、最後のNEA 活性化の際の量 子効率の時間変化をみたものである。Yo-Yo 法とよばれるCs と酸素を交替で添 加することで、徐々に量子効率が上昇しているのが確認できる。ピーク値にお いて8%程度の量子効率が得られている。

# 4. 開発スタッフ

責任者 : 栗木雅夫 (広島大学先端物質科学研究科)

担当者 : 栗木雅夫 (広島大学先端物質科学研究科)

## 5. 参考文献(2008 年度中の発表および掲載論文)

[1]. M. Kuriki et al., "Status of photo-cathode test bench", Proc. of 5th annual meeting of Accelerator Society of Japan, TP120 (2008)

[2] M. Yamamoto, M. Kuriki et al., "Development of a 200keV polarized electron source: Status of a 50µA beam operation", Proc. of 5th annual meeting of Accelerator Society of Japan, FO02(2008)

[3] M. Yamamoto, M. Kuriki et al, "Development of the emittance measurement system of a high intensity pulsed electron beam from NEA-GaAs type photocathode", Proc. of 5th annual meeting of Accelerator Society of Japan, TP116 (2008)

[4] T. Konomi, M. Kuriki et al., "Degradation mechanism of NEA-GaAs photocathode surface analyzed by QE mapping data", Proc. of 5th annual meeting of Accelerator Society of Japan, TP117 (2008)

[5] A. Murata, M. Kuriki et al., "Cs-Te フォトカソード S バンドRF-Gun の開発", Proc. Of 5th annual meeting of Accelerator Society of Japan, TP122 (2008)

[4] S. Kashiwagi, M. Kuriki et al., "L バンドフォトカソードRF 電子銃の開発", Proc. of 5<sup>th</sup> annual meeting of Accelerator Society of Japan, TP126 (2008)

[7]R. Sakanaka, M. Kuriki et al, "Progresses in R&D efforts on the energy recovery linac in Japan", Proc. of European Accelerator Conference, MOPC061 (2008)

[8] S. Kashiwagi , R. Kato, G. Isoyama, H. Hayano, T. Muto, J. Urakawa, M. Kuriki, "Development of a Photocathode RF Gun for an L-band Electron Linac", Proc. of European Particle Accelerator Conference (EPAC08), TUP094 (2008)

[9] N. Nishimori, R. Nagai, H. Iijima, Y. Honda, T. Muto, M. Kuriki, M. Yamamoto, S. Okumi, T. Nakanishi, and R. Hajima, "Development of an electron gun for an ERL based light source in Japan", Proc. of WS on Sources of Polarized Electrons and High Brightness Electron Beams(PESP08), to be published (2008)

[10] M. Yamamotoa, T. Konomi, S. Okumi, Y. Nakagawa, N. Yamamoto, M. Tanioku, X. Jin, T. Ujihara, Y. Takeda, F. Furuta, H. Matsumoto, M. Yoshioka, M. Kuriki, C. Shonaka, and T.Nakanishi, "Status of 200keV beam operations at Nagoya University", Proc. of WS on Sources of Polarized Electrons and High Brightness Electron Beams(PESP08), to be published (2008)

[11] S. Kashiwagi, R. Kato, G. Isoyama, H. Hayano, T. Muto, J. Urakawa, M.Kuriki, "Development of a Photocathode RF Gunfor an L-band Electron Linac" Proc. of XXIV Linear Accelerator Conference, TUP094 (2008)

# C-1. 直流高圧電子源のための高電圧発生装置の開発

電子源は高輝度光子源(コンプトン光源)の性能を決める重要な構成機器である。光 子源の輝度、フラックスを大きくするためには、電子ビームのエミッタンスを小さく、 かつ、平均電流を大きくしなければならない。われわれは、このような電子ビームの生 成を目的とした直流高圧電子源(DC電子銃)の開発を行っている。DC電子銃を採用する 利点は二つある。まず、大電流の電子ビームを容易に生成できることである。通常パル スモードで運転される RF電子銃と異なり、DC電子銃は完全な CW 運転(100% duty)が可 能であるため、カソードとドライブレーザーが所要の性能を満たしさえすれば、平均電 流 10-100 mA の電子ビームの生成が可能である。もうひとつの利点は、カソード近傍で 高い真空が得られるために、表面を NEA 状態(negative electron affinity=負電子親和 力)としたカソードを利用できることである。NEA カソードでは、電子の初期エミッタン ス(熱エミッタンス)を原理的に室温相当(~25meV)まで小さくすることができる。設計 計算では、NEA カソードに加えて、レーザ波形整形技術、電子銃を含む入射器の最適設計 を組み合わせることで、規格化エミッタンス 0.1 mm-mrad の電子ビームが得られること が示されている。

このような優れた特長をもつ DC 電子銃であるが、その実現には多数の技術的な課題を 解決しなければならない。次世代光子源に必要な DC 電子銃の電圧は 500 kV 以上、カソ ード寿命(引き出し電荷量)は 10000 C以上(100 mA、1 日連続運転)であるが、これま でに運転されている電子銃は JLAB(米国 Jefferson Laboratory)の 350 kV、引き出し 電荷量~500 C のみである。本プロジェクトでは、世界最高電圧の 500 kV の直流高圧電 子源(DC 電子銃)の開発を行い、次世代光子源の性能(輝度、フラックス)を大幅に引 き上げるオプションを提供することを目的とする。

今年度は、DC電子銃の主要なコンポーネントである直流高電圧発生装置の設計と製作を 行った。これらの成果を以下に述べる。

DC 電子銃では、Cockcroft-Walton 型の高電圧発生装置を用いる。この装置は、整流素 子とキャパシタンスを組み合わせた梯子型回路に交流電源(または、高周波パルス電源) をつないで、高電圧ターミナルに向かって電荷を汲み上げるものである。時定数の長い 電圧変動はフィードバック回路で制御可能であるが、駆動電源の周波数で生じる電圧リ ップルを取り除くのは容易でない。このような電圧リップルが電子ビーム特性に与える 影響を詳しく検討する必要がある。

われわれは、500 kV 電子銃、合流エネルギー 5 MeV、最終エネルギー 70 MeV のモデル を使って、電子銃電圧変動がビーム特性に与える影響を評価し電子銃電圧の変動許容値 を 1x10<sup>-4</sup>(p-p)と決定した。

Cockcroft-Walton 電源における電圧リップルの大きさは、駆動周波数 f、負荷電流 I、 梯子型回路の段数 n、各段のキャパシタンス Cの関数として与えられる。

$$\Delta V = \frac{nI}{2 fC}$$

大電流(10 mA 以上)が必要な電子銃では、上式で与えられるリップル電圧を1x10<sup>-4</sup>以下 にすることは難しい。リップルを小さくするには、LC フィルタを出力側に挿入するのが 有効であり、われわれは、この方式を採用した。図1に LC フィルタを組み込んだ Cockcroft-Walton 回路を示す。

L=L<sub>1</sub>、C=C<sub>1</sub>のLCフィルタを挿入した時のリップルは、次のように計算できる。

$$\Delta V = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L_1 C_1} \frac{nI}{2fC}$$

前年度までに別途製作した先行試作機である 250kV-50mA の Cockcroft-Walton 電源では、 リップルの実測値は 48V(p-p)、250kV に対して  $1.9x10^{-4}$ の値であった。今回製作した 500kV-10mA 電子銃では、表1のパラメータで設計を行った。要求仕様の電圧リップル値<  $1x10^{-4}$ を満たす設計となっている。

製作した高電圧発生装置のリップル計測と別途用意した絶縁ガスタンク内に取り付けて の高電圧発生の試験を行った。図2に絶縁ガスタンクと高電圧発生装置を含む 500kV 電子 銃の高電圧部の図を示す。図3に製作した高電圧発生装置の写真を示す。10mA の負荷電流 を流すための抵抗と 1/5000 の高電圧プローブを高電圧端に接続してリップルの計測を行 った。計測されたリップルの波形を図4に示す。図4左の図は負荷電流を取らない時の波 形であり、駆動回路からのノイズ成分が 17.6mV (p-p)であることを示している。図4右の 図は負荷電流 10mA でのリップルの波形であり、先ほどのノイズ成分を差し引くとリップ の値は 24V (p-p)であり、500kV に対して 4.8×10<sup>-5</sup>の値であり、要求仕様<1x10<sup>-4</sup>を満たし ている。図5には高電圧発生試験時の電圧-電流特性を示す。このグラフの傾きは高電圧 電源のフィードバック抵抗で決まるものである。このことより高電圧発生時に不要なコロ ナ電流の発生はなく安定に高電圧が発生できていることが分かる。

以上に述べたように、平成20年度は、直流高圧電子源(DC電子銃)の主要なコンポー ネントである直流高電圧発生装置の製作を行った。製作した直流高電圧発生装置の高電圧 印加試験を大気中(最大100 kVまで)、絶縁ガス中(最大550 kVまで)にて実施した。 次年度は、別途製作したセラミック管、サポートロッド、ガードリングを装着して同様の 試験を行う。これによりDC電子銃の世界最高電圧500 kVを達成する。さらに、別途製作 したカソード調製用真空槽、カソード・ローディング用真空槽などを組み合わせて、電子 ビーム引き出し試験を行い、DC電子銃の基本動作を確認する予定である。これに必要なカ ソード洗浄装置(原子状水素発生器)、極高真空ポンプ、ビームダンプなどを本プロジェ クト予算で用意する。



図1. LCフィルタを備えた Cockcroft-Walton 回路

	先行試作機	今年度製作機	最終目標(将来計画)
電圧-電流	250kV-50mA	500kV-10mA	500kV-100mA
駆動周波数	20 kHz	40 kHz	40 kHz
各段静電容量	8.4 nF	2.4 nF	8.4 nF
段数	6	12	12
フィルタ $L_1$	1.2 H	2.0 H	2.0 H
フィルタ $C_1$	1.4 nF	0.2 nF	0.7 nF
リップル(計算値)	3.4 x 10 <sup>-5</sup>	1.2 x 10 <sup>-5</sup>	1.0 x $10^{-5}$
リップル(実測値)	1.9 x 10 <sup>-4</sup>	4.8 x 10 <sup>-5</sup>	

表 1. 製作した直流高電圧発生装置の仕様



図2. 500kV 電子銃の高電圧部



図3. 製作した 500kV 高電圧電源の Cockcroft-Walton 回路(左)と駆動回路(右)



図4. 電圧リップル波形



# C-2. 直流高圧電子源と組み合わせて使用する CW 超伝導加速空洞の研究開発

CW 超伝導加速空洞は、直流高圧電子源で発生する低エミッタンスかつ大電流の電子 ビームを安定に加速するための重要な構成機器である。CW で大電流を加速するとき、 問題となるのが空洞の高次モード(Higher-Order Mode: HOM)の存在である。HOM は電 子ビームが空洞を通過することにより励起され、加速に寄与せず、電子に擾乱を与え る電磁波モードである。超伝導空洞の場合は、加速モードにおける高周波損失が小さ いという利点があるが、同時に空洞内で励起される HOM に対しても低損失となるため、 空洞内で HOM を減衰させ難いという欠点がある。さらに CW 加速器の場合、定常的にビ ーム加速が行われることも、HOM 減衰を困難にする要因となる。そのため CW 超伝導加 速空洞においては HOM を効率的に減衰させることが安定加速の必要条件となる。

加速空洞に取り付けられているビームパイプを太くすると、ビームパイプ内を伝播 できる電磁波モードの下限周波数を低くすることができるため、通常は伝播できない 周波数を持つ単極型や双極型 HOM がビームパイプ中を伝播できるようになる。ビーム パイプ中を伝播できれば、ビームパイプの途中に設置した高周波吸収体を用いて HOM を減衰させることは容易になる。

しかし、四重極型 HOM は伝播周波数の下限も高く、ビームパイプを太くすることだけで減衰させようとすると、かなり太めのビームパイプが必要になり、加速器として 実用的でなくなる。われわれは、四重極型 HOM を空洞外に取り出すために偏心フルートを考案した。フルートはビームパイプに溝のようなくぼみをビーム軸方向に堀込んだものであり、これまでは双極型 HOM の取り出しに用いられてきた。このフルートを ビームパイプ中心軸の周りで折り曲げた構造にすると、四重極型 HOM が双極型に変換 されることが分かった。四重極型 HOM を効率よく減衰させるために偏心フルートの最 適化を行い、その結果をもとに偏心フルート付き9連空洞試作機を用いて高周波特性、 及び加速モードに対する影響等を調べた。これらの成果を以下に述べる。

3次元高周波電磁場解析コード「MAFIA」を用いて、偏心フルートによる四重極型 HOM の減衰性能を評価した。ビームパイプを伝播する HOM の減衰性能を比較する場合、ビー ムパイプにおける外部Q値を求めればよい。減衰性能が良いほど外部Q値は小さくなる。 偏心フルートの性能を決めるパラメータとして、角度、長さ、幅、深さ、位置がある。 各パラメータを変えながら外部Q値の計算を行った。さらに偏心フルートを取り付けた TESLA型の3連モデル空洞を用いて、ビームパイプにおける外部Q値の測定を行い、計 算結果の検証も行った。計算結果と測定結果を図6と図7に示す。計算結果と測定結果 はよく一致している。

図6は偏心フルートの角度による外部Q値の変化を、図7は偏心フルート取り付け位 置による変化を表している。四重極型 HOM は縮退した2つのモードがあり、おのおのを ビーム軸周りに45度回転させたモードである。図の E-boundary、M-boundary は、ビー ム軸に沿って偏心フルートに対して対称な面での境界条件がそれぞれ電界型、磁場型で あることを示す。これらの両方に対して偏心フルートが効果あることが望ましい。図6 よりフルート角度を25度近辺にすると両方の縮退モードに対して外部Q値を小さくで きる。また図7より取り付け位置はできるだけ空洞に近い方が外部Q値を小さくできる ことがわかる。



偏心フルートの最適化を確認するために、高エネルギー加速器研究機構において前年 度までに別途試作した9連空洞を用いて、偏心フルートの特性測定を行った。試作機の 偏心フルートパラメータを表2に示す。偏心フルートの位置はできるだけ空洞に近い方 が望ましいが、空洞加工工程を考慮し、空洞端面から25mmの位置とした。9連空洞の 偏心フルート部分の構造を図8、図9に示す。

9 連空洞を使って、液体ヘリウム温度での縦測定を行い加速電界の測定を行った。空 洞および偏心フルート近辺には、電子放出による放射線を検知する PIN ダイオードと発 熱による空洞温度上昇を検知する抵抗温度計などのモニターを取り付けた。加速電界の 上昇に伴い超伝導空洞部分で放射線の発生が検出された場合でも、偏心フルート部分で は放射線は検知されず、さらに温度上昇も見られなかった。これらにより偏心フルート に起因する異常なふるまいは見られず、設計の妥当性が確認された。

以上に述べたように、平成20年度は、超伝導空洞のHOM 取り出しのための偏心フル ートの設計、試作機を用いた特性測定を行った。計算、測定の両面から行い、偏心フル ートによる四重極型HOMの減衰特性を調べ、最適な偏心フルートのパラメータを決定し た。また、9連空洞の低温空洞試験の結果から、偏心フルートは、加速電界に悪影響を 及ぼすような発熱や電子放出の原因にならないことを確認した。次年度は、空洞におけ る実際のHOM減衰性能を決めるHOM減衰器の設計、製作を行う予定である。



表2. 製作した9連空洞における偏心フルートのパラメータ



図8.9連空洞の偏心フルート(側面図)



# 成果の外部への発表

# 学会発表

発表した成果(発表題目、ロ 頭・ポスター発表の別)	発表者氏名	発表した場所(学会等名)	発表した時 期	
Development of an electron gun for an ERL based light source in Japan (口頭)	N. Nishimori, R. Nagai, H. Iijima, R. Hajima, Y. Honda, T. Muto, M. Kuriki, M. Yamamoto, S. Okumi, T. Nakanishi	Workshop on Sources of Polarized Electrons and High Brightness Electron Beams, CEBAF Center, Jefferson Lab Newport News, VA	2008 年 10 月	国外
Development of an electron gun for ERL based light sources (口頭)	Nobuyuki Nishimori, Ryoji Nagai, Hokuto lijima, Yosuke Honda, Toshiya Muto, Masao Kuriki, Masahiro Yamamoto, Syouji Okumi, Tsutomu Nakanishi, and Ryoichi Hajima	JSPS Asian Core Program Workshop on Quantum Radiation Sources for Advanced Energy Science, Daejon, Korea	2009 年 3 月	国外
ERL 放射光源のための高輝度 大電流電子銃の開発の現状 (ポスター)	羽島良一,永井良治,飯島 北斗,西森信行,本田洋介, 武藤俊哉,山本将博,奥見 正冶,中西彊,栗木雅夫	日本放射光学会年会合同シンポジ ウム、東京	2009 年 1 月	国内
ERL主加速器のための超伝 導加速空洞開発の現状(ポス ター)	梅森健成、阪井寛志、坂中章 悟、沢村勝、篠江憲治、高橋 毅、古屋貴章	日本放射光学会年会合同シンポジ ウム、東京	2009 年 1 月	国内
ERL超伝導主加速器用HO Mダンパーの開発(ロ頭)	沢村勝、梅森健成、古屋貴章、 阪井寛志、篠江憲治	日本原子力学会 2009 年春の年会、 東京	2009 年 3 月	国内
ERL 電子銃の開発状況(ポス ター)	西森信行,永井良治,飯島 北斗,本田洋介,武藤俊哉, 山本将博,奥見正治,中西 彊,栗木雅夫,羽島良一	第 26 回 PF シンポジウム、つくば	2009 年 3 月	国内

ERL 入射器に求められる要求 とその達成へのシナリオ(ロ 頭)	羽島良一	高輝度電子源検討会、東広島	2009 年 1 月	国内
500kV 電子銃の光陰極準備容 器・高電圧容器の設計 (ロ頭)	西森信行	高輝度電子源検討会、東広島	2009 年 1 月	国内
500kV-10mA 電源の製作状況 とビームダンプの基本設計 (ロ頭)	永井良治,羽島良一,西森 信行,飯島北斗,沢村勝, 菊澤信宏	高輝度電子源検討会、東広島	2009 年 1 月	国内

# 学会誌雑誌における論文掲載

掲載した論文(発表題目)	発表者氏名	発表した場所(学会誌・雑誌等名)	発表した時 期	
Status of R&D Efforts Toward the ERL-Based Light Source	Shogo Sakanaka, Yukinori Kobayashi, Kotaro Satoh, Toshio Kasuga, Hiroshi Kawata, Ryoichi Hajima, Norio Nakamura	Proc. the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp. 225-227	2008 年 8 月	国内
R&D Status of a High-Brightness Electron Gun for Future ERL Light Sources	Ryoichi Hajima, Ryoji Nagai, Hokuto lijima, Nobuyuki Nishimori, Yosuke Honda, Toshiya Muto	Proc. the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp.607-609.	2008 年 8 月	国内
Status of Superconducting Cavity Development for ERL Main Linac	Masaru Sawamura1, Kensei Umenori, Takaaki Furuya, Shogo Sakanaka, Takeshi Takahashi, Hiroshi Sakai, Kenji Shinoe	Proc. the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33th Linear Accelerator Meeting in Japan, pp.610-612.	2008 年 8 月	国内

# D. パルスレーザ蓄積装置開発

#### 概要

超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源における、パスルレ ーザ蓄積装置開発を行っている。レーザ電子散乱による高輝度光子源の 小型化のためには、パスルレーザを共振器内に蓄積、集光し高効率でレ ーザ電子散乱を起こすことが重要である。本課題は、そのための4鏡リ ング型共振器の開発である。最終的にはレーザパスルの蓄積により、パ ルスあたり50mJとしかつそれを、8µmに集光することを目標としている。 平成20年度は4鏡共振器の基礎構成と高精度制御装置開発のためのテ ストベンチの構築を目標とした。

#### Abstract

The project aims a development of a laser pulse stacking cavity for a next generation compact high intense x-ray source by superconducting accelerator. To make the compact system, it is important to stack and focus laser pulses in the resonant cavity. This project is development of four mirror ring cavity. The final target is to achieve 50mJ/pulse and focus down to 8 $\mu$ m. The goal of JFY 2008 is to set up test bench for precision feedback system and for four mirror cavity.

## 1. 平成 20 年度開発事業

本事業では、パスルレーザを 共振器内に蓄積し、レーザの強 度を実効的に増大する技術の開 発を目的としている。レーザと 電子の散乱頻度を上げ、生成す るX線強度を増大するためには、 レーザ蓄積共振器における蓄積 率の向上及び、共振器内のレー ザ・電子衝突点におけるレーザ の集光を行う必要がある。この2 項目を同時に達成するため、本 事業に置いては、4枚の鏡からな るリング型の共振器の開発を行 っている。図1はその完成概念 図である。この共振器は KEK に おいて開発実績のあるファブリ ペロー型2鏡共振器に比べると、 構造が複雑で目標とする性能も

高いため、共振器の構造の詳細な



図 1. 4 枚鏡レーザ蓄積共振器概念図





検討と、高精度の制御システム開発が必要となる。この観点から初年度

は、4 枚鏡による共振器の試験 システム構築および制御システ ム開発環境構築を念頭においた。

# 4 鏡共振器の試験

図2は光学定盤上に構築した 4 鏡共振器試験システムである。 この装置を用いて、共振器の連 続発振レーザに対する特性を測 定した。その結果、近接した二 つの共振状態の存在を確認した。 4 鏡共振器において水平方向と 垂直方向の集光点を一致させる ためには共振器の鏡を立体的 に配置しなければならない。そ の結果として、レーザの右偏向 と左偏向状態の共鳴点が分離 することが知られており、本試 作機においてもそれを明確に 観測した。図3は、その状況を 示す共振器に直線偏光したレ ーザを入射した場合の共振特 性である。近接した二つのピー クはそれぞれ、直線偏光レーザ 中の右偏向、左偏向成分の共鳴 に対応している。我々は、この 特性が共振器の共鳴信号に利 用可能であることを見いだし、 その試験を行った。図4は共鳴 信号を取り出すための光学系 である。直線偏光のレーザを入 射した際の共振器からの反射 光中の左右偏向線分を分離し てその差分をとることにより、 共鳴状態の情報をえることが できる。図5は実際に観測され



図 3. 4 枚鏡の直線偏向レーザに対する共 振特性。二つのピークはそれぞれ右偏向、 左偏向成分の共振に対応する。



図 4. 左右偏向を用いた共鳴信号取り出し のための光学構成



図 5. 実際の共鳴信号(中段)下段は通常の 共振器からの透過光強度

た共鳴信号であり、予想と一致した結果である。この方法の光学共振器 の共鳴信号の構築は本開発研究において見いだした新たな知見であり、 その結果を optics communications 誌に投稿した。これと平行して、立 体配置の4鏡共振器内におけるレーザの伝搬状態についての解析方法を 確立した。これと比較するために、共振器内におけるレーザの集光状態 を実測する方法に関する開発を進めている。 以上と平行して、共振器の制御方法の開発研究のためのテストシステム を構築している。現在、連続発振レーザ、ファブリペロー型2鏡共振器、 光学変調器などからなるテストシステムの構築を行っており、平成20 年度中には稼働できる見込みである。

# レーザと電子線による

## γ 線生成実験

KEK-ATFにおいて、パス ルレーザと2鏡ファブリペ ロー型共振器を用いた γ 線生成実験を行い、実際の 加速器運転下における共 振器の動作とレーザ・電 子散乱による γ線生成の 実証を行った。図6は KEK - ATF に組み込まれた共 振器である。

平成 20 年度では、共振器 内に入射レーザの約 250 倍を蓄積することに成功 し、1 秒間に 1.2×10<sup>8</sup> 個の γ線を生成することに成 功した。(図 7)



図 6. KEK-ATF に導入された 2 鏡共振器



## 2. 平成 21 年度計画

4 枚鏡共振器開発

## 図 7. KEK-ATF 実験において測定された y 線の energy deposit

20年度に構築した試験システムによる開発を継続する。以下の2点を 重点目標とする。

 1) 共振器内のレーザの集光状態を測定する方法の確立と測定。測定値 をレーザ伝搬状態の計算と比較することにより、その正当性を実証する。
 2) パルスレーザ入射による共振状態の測定。20 年度は、共振状態の観 測が容易な連続発振レーザによる試験から開始した。これによる4枚鏡 共振器構築の基礎技術および基本特性測定技術の開発を行ったのち、パ ルスレーザによる共振試験を行う。

### 4枚鏡共振器実機の設計

試験システムによる基本技術開発の結果をもとに、電子ビームと合わ せたX線生成のための実機の設計を開始する。最初に現在KEKにおい て稼働している、繰り返し 357MHz の電子ビームに合わせた共振器によ るX線生成の実証を目的に、これにあわせた設計を行う。

### 共振器制御システムの開発

4 枚鏡共振器をレーザパスルとの共 振状態に保つための高精度制御シス テムとして、デジタルフィードバッ クシステムの構築を目的とした開発 を行う。図はデジタルフィードバッ クシステムの概念図である。市販の FPGA 素子搭載 AD-DA ボードを用いた デジタルフィードバックシステムの 構築を図る。



図 8. デジタルフィードバックシス テムの概念図(上図)と FPGA 搭載 DA-ADC ボードの例

#### 3. 開発スタッフ

責任者 高橋 徹 (広島大学先端物質科学研究科) 担当者 本田洋介 (高エネルギー加速器研究機構)

4. 学会発表など

- 牛尾恭彰 KEK-ATF における ILC 偏極陽電子源の為のレーザー蓄積空洞を用いた高輝度ガン線生成実験の現在までの結果と進展 日本物理学会 2008 年秋の分科会 2008 年 10 月
- 三好修平 Gamma ray generation by laser-Compton scattering at the KEK-ATF TIPP09 2009年3月
- 三好修平 KEK-ATF における ILC 偏極陽電子源の為のレーザー共振器を用いた 高輝度ガンマ線生成実験 I 第 64 回年次大会 2009 年 3 月
- 赤木智哉 KEK-ATF における ILC 偏極陽電子源の為のレーザー共振器を用いた 高輝度ガンマ線生成実験 II 第64回年次大会 2009年3月

# E. パルス超伝導加速空洞技術の開発

#### 概要

将来の小型高フラックス X 線源用要素技術開発のために、 超低エミッタンスビームの 加速に必要なパルス運転型の超伝導加速空洞の研究開発を進めている。本計画では、 1. 3GHz 9 セル超伝導空洞 2 台からなるクライオモジュールを平成 23 年度までに完成す るように開発する。超伝導加速空洞はビームのウェーク場の影響を受けにくい大きなビ ームアパーチャーの空洞であり、なおかつ超伝導を利用した高電界を出せるものである。 大きなビームアパーチャーはビーム通過による高調波モードの減衰にも有利である。実 用化に必要な高電界化と高次モード減衰の開発研究のため、9 セル加速空洞の製作と表 面処理および縦型クライオスタットによる電界試験を行なった。また、高次モードの研 究のため、HOM ダンパーの開発および HOM ダンパー付 9 セル空胴および HOM ダンパー付 き2セル空胴(CW 運転用バンチャー超電導空洞試作装置)の測定を行い、ダンピング 性能の研究を行った。平成20年度の最も重要な成果は、モデル空洞3台と、空洞に大 電力の高周波を供給する為の入力カプラーを試作した事、そして将来の大電流化(CW 化)を展望して2セル空洞の試作も行った事である。そして9セル超伝導空洞を横型試 験クライオスタットに装備して、クライストロンからのパルス RF を印可して、32MV/m の高電界で運転したことは重要な成果である。次年度の目標は、試作した9セル空胴、 2セル空胴の加速空洞を縦置きクライオスタットに入れて、より高い加速電界を出すよ うに表面処理工程と空洞アセンブリー工程を改善していき、高周波設計、製作方法の妥 当性を評価しつつ、35MV/m 以上の高電界を実証する事である。そしてその結果をみて 実機の製作に取り掛かる予定である。

### 9セル超伝導空洞の開発

①-A-図1に示すように、空洞はニオブ材を使用して9個のセルと両端のビームパイプ部から構成する。各セルはアルミ製プレス型でプレス成形される2枚のニオブ製ハーフセルから出きている。最両端のハーフセルは高周波特性と機械強度特性に対する要求から他のハーフセルとは、厚み、形状を変えてある。又機械強度を上げる為、両端を除くハーフセルにはスティフナーと呼ぶ板状のニオブリングを溶接してある。ビームパイプは板材よりロール整形で製作し、後にチタンジャケットを溶接するための、ニオブとチタンを溶接して作られるジャケットベースプレートと、空洞電圧モニター、高周波入力カプラー及びHOMダンパー用の各ポートが設けられる。HOMダンパー用ポートには、HOM取出カプラーを溶接するが、その他のポート及びビームパイプ端部には、ニオブチタン合金のフランジを溶接する。このように加速セルを多連化して、加速効率を上げ、かつHOMを減衰させる構造を持たせ、かつビーム通過アパーチャーを拡げてウェーク場の影響を極小化するような加速構造は超伝導空洞が得意とするところである。本開発では、このような9セル加速空洞を製作し、その機械強度測定や高周波特性測定を行なって、製作誤差の評価を行い、表面処理を行ないその内面検査を行なって、表面処理の評価を行い、最終的に高電界試験を行う。



①-A-図1:9セル加速空洞

### 2 セル超伝導空洞の開発

より大電流の加速を行なう時の問題点はビーム加速に供する高周波大電力を空洞に 供給する必要がある事、また、その大電流により励起される HOM のパワーを効率よく取 出す事である。これを両立させるためには、もはや多連セルでは励起される HOM が非常 に大きくなりかつ端部からそれらを引き出せなくなるので、極小連結セルである 2 セル を採用せざるを得ない。大電力を扱う事のできる入力カップラーを多数装備し、効率よ く HOM にカップルできる HOM ダンパーを数多く配置し、そして、ビームエミッタンスの 増大を極力抑えるために、構造を軸対象にする事が重要である。①-A-図 2 に示した試 作空洞は入力カップラー2 台と HOM 取出カプラーを 5 台装着しているものである。本年 度の開発研究においてこのような 2 セル加速空洞の開発を行なった。

# 入力カップラーの開発

本研究開発において開発されたカップラーは、①-A-図3に示すように同軸型のカプ ラーで、万一のセラミック窓の破損に備えて、低温部と常温部の2カ所に同軸型のセラ ミック窓を配置している。低温部カプラーは外径60mmで外導体は厚さ0.8mmのステン レスパイプに3µmの銅メッキを施したもので熱侵入を極力抑えた設計になっている。 内導体は厚さ1mmのステンレスに10µmの銅メッキをしている。又長さを、±3mm変え られるようベローを取り入れている。室温部カプラーは外径82mmで、外導体は厚さ1mm のステンレスパイプに10µmの銅メッキを施したもの、また、内導体は厚さ1mmのステ ンレスに10µmの銅メッキをしてある。又長さの変化や曲がりを吸収するために、内導 体、外導体のそれぞれ2ヶ所にベローを取り入れてある。 高周波窓は純度95%以上 のディスク型アルミナセラミックで、両面に100Å以上の窒化チタンコーティングをす ることでマルチパクターを抑え耐電力特性の向上をはかっている。


①-A-図2:2セル加速空洞



①-A-図3:入力カップラー

### 超伝導空洞の横置きクライオスタット試験

ビーム加速に必要な超伝導空洞のパルスRF運転においては、パルス幅1.5ms、繰り返し5Hzのパルス運転を安定に行う必要がある。ビーム加速は0.5ms後から1.5msまでの間のフラットトップ部で行い、この時に加速電界を一定に保持しなければならないが、実際には、電磁界応力による空洞変形でローレンツ・デチューニングが起こり、時間とともに空洞共振周波数が大きく変化して離調していき、その結果、加速電界もパルスの終端まで低下し続ける。加速電界および空洞位相を一定に保持するために、入射電力と入射高周波位相を制御するRFフィードバックをONにして、ビーム加速ができる電場を供給できる事を実証しておく必要がある。

本開発研究の関連研究であるビーム加速のための試験として横置きクライオスタットに装着した9セル超伝導空洞のパルスRF運転試験を行なった。ローレンツ・デチューニングを補正するピエゾチューナーを動作させ、RF振幅と位相にフィードバックをかけ、

高加速電界を達成する試験を行った。その結果を①-A-図4に示す。そこでは運転目標 (31.5 MV/m)を超える高加速電界で安定運転時の#2空洞のパルス波形:上段左図はRF フィードバック制御をOFFした時、上段右図はONした時を示す。青は空洞への入射高周 波電力(Pin)、水色は基準信号に対する入射高周波の位相(φin)またはピエゾドラ イブ電圧波形、緑は基準位相に対する空洞位相(φt)、ピンクは空洞加速電界(Eacc) をそれぞれ示す。



①-A-図4:RF振幅と位相に対するフィードバックを0N/0FFさせた時の高電界運転 波形。上段左はフィードバック0FFで上段右はフィードバック0Nである。これらに ピエゾを動作させて、その違いを見たのが下段の図である。下段左はピエゾ0FFで、 下段右はピエゾ0Nである。運転電圧はやや下がったがピエゾ補正の効果があり、RF 振幅と位相をフラットに出来ている。

#### 総括

平成20年度の最も重要な成果は、モデル空洞3台と、空洞に大電力の高周波を供給 する為の入力カプラーを試作した事、そして将来の大電流化を展望して2セル空洞の試 作も行った事であるが、それにも増して9セル超伝導空洞を横型試験クライオスタット に装備してクライストロンからのパルス RF を印可して、32MV/m の高電界で運転したこ とも重要である。次年度の目標は、試作した9セル空胴、2セル空胴の加速空洞を縦置 きクライオスタットにおいてより高い加速電界を出すように表面処理工程と空洞アセ ンブリー工程を改善していき、高周波設計、製作方法の妥当性を評価しつつ、35MV/m 以上の高電界を実証する事である。そしてその結果をみて実機の製作に取り掛かる予定 である。(本プロジェクトの目標電界は30MV/mであるが、放電等による空洞電界の劣 化を考慮して、縦測定での目標を35MV/m以上として開発を行っている。)

# F. CW超伝導加速空洞技術の開発

### 概要

超伝導高周波加速技術を使った 5nm~0.025nm 波長領域の小型高輝度 X 線発生装置の 開発とその実用化に必要な基盤技術の確立を行うことが目的である。小型 X 線発生装置 ができれば大型放射光発生装置で行っているポストゲノム次世代の生命科学研究、超精 密マイクロリソグラフィ、ナノ超微細構造研究等が研究室レベルで行うことができる。 本課題はその光源となる電子の加速に、パルス駆動の加速空洞ではなく連続(CW)運転が 可能な超伝導空洞を適用することによって X 線輝度を飛躍的に向上させようとするも のである。そのためには CW 運転が可能な空洞本体とともに、CW 運転が可能な高周波電 力源の開発、その電力を極低温空洞へ伝送する入力結合器の開発が不可欠である。

#### はじめに

X線は医療、生命科学、材料科学など広い分野で利用されている。研究の進展は発生 するX線の輝度、時間構造、スペクトラムなどに制限されており、研究の裾野を広げる ためにも小型でかつ高輝度X線発生が可能な装置が望まれる。本研究は電子ビームとレ ーザとのコンプトン散乱により、短パルスでかつ準単色X線を幅広い波長領域で発生可 能な小型システム開発を目指すものである。さらにその発展型として輝度を飛躍的に向 上させることができるCWモード(連続運転)が考えられ、それには高い加速電界での CW運転が可能な超伝導加速空洞の技術確立が必要である。本課題では、そのようなCW 型高電界超伝導空洞の製作技術の確立とともに、その基幹技術として不可欠な大電力高 周波源、高周波入力結合器、さらにエネルギーの節約や放射線対策への効果が期待され るエネルギー回収技術の開発を行う。

#### CW 方式の考え方

高電界を用いると短い加速空洞で十分な加速電圧が得られるが、パルス駆動になるため、平均電流値は小さく抑えられる。これに対しCW運転はピーク値は小さくても大きい平均電流値が得られるため、発生する放射光の輝度にも飛躍的な向上が期待できる。 ①-B-表1にその差をまとめた。他方、CW稼働による強力なビーム電力は、大きな高周 波電力が必要であること、ビームを捨てる際に発生する放射線遮蔽が困難などの問題を 持つことが予想される。

これらを解決する方法として、エネルギー回収方式の導入が有望である。①-B-図1 にその概要を示す。電子銃からのCWビームを3MV程度の入射空洞で加速した上で22MV の主空洞で加速する。そのビームを放射光光源として利用した後は、再び主空洞に減速 位相で入射しビームの運動エネルギーを回収することで、廃棄するビーム電力を一桁小 さくすることが出来る。これらを構成する要素として技術の基幹となるものはCW型の 超伝導主加速空洞であり、さらに入射部には300kW級のCW型高周波電力源とその電力 を伝える入力結合器および入射部加速空洞である。本課題ではこれらの要素技術の開発 を行う。



①-B-図1:次世代小型高輝度光子ビーム源のCW稼働概念図

# 空洞開発

## 9 連空洞開発

CW 型空洞では平均加速電流値が高いため、加速空洞と電子ビームとの相互作用が大き い。すなわちビームによって励振される有害高調波を極力排除しなければならない。こ の高調波対策をした 1.3GHz 空洞形状を①-B-図 2 に示す。また電磁場計算から得られる 空洞の特性を表 2 に示す。加速セル間のアイリス径を 80mm とし、両端には大口径のピ ープパイプを配置することによって、ビームによって励起される空洞内高調波は両側ビ ームパイプへ伝搬することができる。これをビームラインに取り付けた高調波減衰器で 吸収する構造であり、1 台当たりの加速電圧は 11MV,電流値 100 mA のビームに励起され る高調波電力は 100W 程度を見込んでいる。現在この空洞(受託外経費)を試作し、そ の特性を計測している。この空洞を 2 台収納したものが CW 型のクライオモジュールと なる。

	Pulse operation	CW operation	
Voltage per cavity	25 MV (pulse)	3 MV + (11 MV x 2台)	
Duty factor	$1 \mathrm{ms} \ \mathrm{x} \ 5 \mathrm{Hz} = 0.5\%$	100% cw	
R/Q	1000	900	
Q0	1x10 <sup>10</sup>	$1 x 10^{10}$	
Cavity loss at 2K	90W x 0.5% = 0.45 W	12W x 2 台 = 24 W	
Beam current	300pC x 162.5MHz x 1ms x 5Hz	77pC x 1.3GHz (!)	

①-B-表1:パルス駆動とCW駆動のパラメーター比較

	3200pC x 2.7MHz x 1ms x 5Hz	
	50mA x 1ms x 5Hz	100mA cw
Average current	0.25mA average	100mA (これが左の 400 倍 !!)
RF source	1.3MW klystron x 0.5% = 7kW	2.5MW
cryogenic	2K refrigerator (2W) 4K 換算で 15W 程度	200W(4K 換算)級の冷凍機
Total AC power	2 kW (RF) + 10kW (refrigerator)	40kW(RF) + 200kW (refrigerator)



# ①-B-図2:CW 駆動型9セル超伝導加速空洞形状

高周波周波数	1300 MHz		
セル数	9セル、πモード		
加速電圧	11 MV		
実効加速電場	10.6 MV/m		
動作温度	2К		
R/Q	897 ohm		
Unloaded Q	1x10 <sup>10</sup> at 10.6 MV/m		
最大入力電力	20kW ビームエネルギー回収型		
有効加速長	1038 mm		

<b>①-B-</b> 表2	: CW 駆動型 9	セル空洞の形状ノ	ペラメーター
----------------	------------	----------	--------

## 入射空洞開発

入射空洞では加速電圧は低いがビームへ伝送する高周波電力が大きいため、2本の入 力結合器を装備する2セル型超伝導空洞を設計した。これによって結合器一本当たりの 負担を半減することが出来る。本年度はこの最適設計を製作工程検証のための試作空洞 を製作した。①-B-図3はその空洞形状を示す。内導体が水冷された2本のアンテナ型 結合器がヘリウム温度へ冷却された空洞へ上下から挿入される。また高調波取り出しの ために5台の高調波結合器を装備している。



-B-図3:CW型入射用2セル超伝導空洞形状

# 300kW・CW 大電力マイクロ波源

# 300kWクライストロンの製作

量子ビーム計画では、大強度で高品質の単色光を獲得するためにレーザ逆コンプトン 散乱による光源を建設するが、現在企画中のパルス源による場合に対して、 CW 超電導 加速空洞の開発研究では、フラックスが更に 400 倍になることからオプションとして重 要な研究課題となっている。

この研究を遂行するため には①-B-表3に示すよう なCWのマイクロ波出力300k Wのクライストロンの製作、 関連するマイクロ波導波管 系のうちカップラー試験の ときに必要な大電力サーキ ュレータ(カップラーから の反射マイクロ波を吸収し、 マイクロ波源に戻らないよ うにする装置)の製作が早



0.89±0.9 µ A/V<sup>2/3</sup> 52kV(Max) 11A(Max) パリウム含浸型カソード 2極管

1300MHz 270kW以上(目標300kW) 5 50%以上(目標60%) 37dB以上

3765以上 500kW(Max) 水冷

縦置き 電子銃部分絶縁油に浸す

#### ①-B-表3:300kW クライストロンの仕様

い段階から進める必要がある。特に 300kWCWクライストロンは諸試験を遂行する上 での要であり早い段階からの開発が必要である。1.3GHz 以外の低い周波数帯では CW の大電力クライストロンが開発され現在も稼動しているものがあるが、1.3GHz 帯で はそのような大電力クライストロンは存在せず 0 からの開発が必要である。

クライストロンを開発する為に、先ずクライストロンの要素部品の開発を行った。ク ライストロンの開発要素部品としては①電子銃②入力及び中間空洞③出力空洞及び出 力回路④コレクター⑤外部アクセサリー(集束コイルや架台)などが上げられ、それぞ れ部品の製作と一部コールド試験での評価などが必要である。H20 年度の予算ではこれ らの要素として3件に分け、(1)電子銃及び出力回路 (2)空洞及びコレクター部 (3)集束コイル及び架台の開発を行った。特に(1)における出力回路の一部を構成 する大電力マイクロ波窓の開発は重要な研究課題であった。これらの部品開発に成功し たので、平成21年度すぐにそれらを合体したクライストロン全体の製作とプロセッシ ングを行うことで1.3GHzの周波数における 300kW、CW 動作のクライストロンの開発 が完成する。これは本計画だけでなく、世界で色々計画されている1.3GHz の ERL 計画

#### 1.3GHz帯のCW、150kWサーキュレータの開発

等にとっても有効なマイクロ波源が開発されたといえる。

300kWクライストロンと共に重要な要素開発は、カップラーからの反射をマイクロ波 源に戻さないようにする 1.3GH z 帯の CW、150kWサーキュレータの開発である。CW 超 電導加速空洞はマイクロ波を 2 つのカップラーを通じて電力を供給する構造になって いるので、定格は 300kWの半分で可である。一般的には大電力用サーキュレータは4 端子入力口を持つ位相型サーキュレータという構造のものを製作するのが普通である。 しかしながらこれは大型であり、鉄やフェライトなどを多く使用した高価な部品である。

この研究では、150kW ということで、3 端子入力口を持つ Y 型サーキュレータを開発 することに成功した。これにより比較的小型化し少量のフェライトの使用で良い比較的 安価なサーキュレータの使用が実現した。このような形式のものを実現する為にはサー

キュレータ本体部分で4 階構造を持つサーキュ レータとマイクロ波の 相互作用部を持つ独特 の設計が必要であった。 この構造の成功により ①-B-図4に示すような 比較的コンパクトな構 成の立体回路の構成が 可能となった。





提案されている外形寸法

# 次年度へ向けて

上記結果を踏まえて次年度では

- (1)9連空洞の性能検証試験および2空洞モジュールの設計を進める。
- (2)2セル入射空洞の性能確信試験と入力電力結合器開発
- (3) CW クライストロンの出力試験

を推進する。

# G. X線検出装置の実用化開発

#### 概要

早稲田大学と協力し、3種類の検出器の検討と試作を行い、X線検出上の問題点を検 討した。試作は主として早稲田大学が行った。高エネルギー加速器研究機構において、 その試作検出器で逆コンプトン散乱X線を検出し、早稲田大学と共同で問題点の抽出 と改良を実施した。そして、X線測定用高速応答検出器(MCP: Micro-Channel Plate) の開発に成功したことを確認した。また、X線エネルギー測定を行うスペクトロメータ としてHOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite)を使ったX線スペクトロメータを早 稲田大学と共同で開発した。試作は主として早稲田大学が行った。その試作スペクトロ メータを使って高エネルギー加速器研究機構で逆コンプトン散乱X線のエネルギーを測 定し、早稲田大学と共同で問題点の抽出と改良を実施した。その結果、HOPGを使用した X線スペクトロメータが構築できたことを確認した。

X線の測定としては、シンチレーター検出器・半導体検出器・マイクロチャネルプレ ートをほぼ同運転条件で比較することによって、それぞれのバックグラウンド感度など を比較した。また、ブラッグ反射板を用いた検出器システムを構築し、レーザコンプト ン散乱 X線としては世界で初めて加速器バックグラウンドと分けて X線を検出し、格段 の S/N の向上を確認するとともに反射角度から生成 X線のエネルギーも計測した。本成 果は実際の利用の際にも大いに役立つことが予想される。本年度の最も重要な成果はレ ーザ蓄積装置とマルチバンチ電子ビームによってマルチパルス構造の X線生成を実証 し、X線生成・検出システムの問題点を洗い出したことにあり、次年度以降の超伝導加 速器と組み合わせる際の指標を示すことができた。次年度は位置読み出し型(撮像型) の検出器の評価を行っていくとともにその成果から実機での利用研究に関しても検討 を行う。

本量子ビームプロジェクトにより発生する X 線のモニターばかりでなく今後の X 線

検出の分野でのブレイクスルーと なる高性能 X 線検出器の開発を目 指す。プロジェクト初年度である 2008年度は、各種検出器技術 のサーベイと実証的な評価を行っ た。大面積を目指す 2次元検 出器として GEM(Gas Electron Multiplier)を応用したガス検出 器、微細イメージを狙うものとし てシリコンピクセル検出器を取り 上げた。



③一図1: MCP によって検出された 100 パルス/Train X 線

時間分解能の高いマイクロチャネルプレート(MCP)を用いて実際に 100Bunches/Train を検出した結果を以下の③-図1に示す。実際に2.8 nsec 毎に 100 パルスのX線が生成 されていることが確認できる。実際に検出されたX線の光子数は1.65×10<sup>2</sup>光子/Train であり、計算機シミュレーション CAIN による計算結果の2.0×10<sup>2</sup>光子/Train にほぼ一 致する。

## X線検出器評価試験

本課題ではまずブラッグ反射板を用いた X 線検出器を試験した。その検出器の構成図 を**③**-図 2 に示す。反射板としては HOPG **Collimator** X-ray

(Highly Oriented Pyrolytic Graphite) を用い、X 線とバックグラウンドを分け るよう構成されている。これはレーザコ ンプトン散乱 X 線としては世界初の試み である。



③-図2:ブラッグ反射型検出器構成図

実際に検出した X 線のタイミングプロット・レーザー強度プロットを以下の③-図 3 に示す。前節同様にレーザコンプトン散乱の予想する通りの結果が得られている。





(左図:タイミングプロット 右図レーザ強度依存プロット)

X線検出器としては上記シンチレーション検出器・MCPの他にSi-PIN半導体検出器を 用意した。そこでマルチパルスX線検出器として最適なものを特定するためにそれぞれ の検出器におけるS/Nを評価した。

	S/N	レーザー強度
シンチレーション検出器(直接検出)	1/4	40.6kW
シンチレーション検出器	1.98	32kW
(ブラッグ反射)		
MCP(直接検出)	1/1.3	30kW
Si-PIN(ブラッグ反射)	1/3	24.2kW

③-表1:検出毎のS/N評価試験結果

③-表1を見て分かるようにブラッグ反射を用いることで約8倍のS/Nの向上が確認 された。実際に検出器として最適なものとしてはMCPがシンチレーション検出器よりも 約3倍良いことがわかる。また、Si-PIN半導体検出器はバックグラウンド、特に中性 子によるバックグラウンドに感度が高く、直接検出は達成できずブラッグ反射を用いて 評価したところシンチレーション検出器よりも6倍悪いS/Nという結果であった。しか しながら半導体検出器はエネルギー分解能が高いという利点があるため、今後中性子遮 蔽を強化するなどの対策をとりさらなるS/Nの改善を予定している。

### X線エネルギー測定試験

③-図2に示したブラッグ反射板を用いた検出器はそのブラッグ反射の特徴から反射 角を測定することによってX線のエネルギー測定、つまりスペクトロメーターとしても 利用することができる。ブラッグ反射板の角度に対する反射率の測定をそれぞれの電子 ビームエネルギーで行った結果を③-図4に、その結果から得られたX線のエネルギー 測定の結果を③-図5に示す。



③-図4:反射板反射率の角度依存測定

③-図5:X線エネルギー測定結果

X線を効率よく反射する角度がビームエネルギーを上げることによってより浅い角度 にシフトしていることがわかる。また、実際に測定された X線のエネルギーもレーザコ

ンプトン散乱が予測するものとよく一致し、この結果からも実際にレーザコンプトン散乱 X 線を検出していることが確認できる。

GEM 型検出器は右図のような GEM フォイルを使って電 離信号のガス増幅を行うもので、2次元の位置情報を保 持できるという画期的な性質を有する。次左図のような 構成をとることで、低エネルギー(<10keV)については、 ガスによる光電吸収を利用、多段に重ねられた GEM フォ



イルによりX線の入射点に対する 2 次元情報を保持したまま充分な増幅度を獲得する



ことができ、これによって次下図に示される良好な X線スペクトル(5.9keV)がえられることが示された。

ガスとしてキセノンなどを選ぶことによって、数 10keV のX線までをカバーする検 出器が実現できる。一方 100keV 以上の高いエネルギーでは GEM フォイルに施した金メ

ッキによる光電子をガス中で捉える事 を想定する。

本年度は実際にこのような金メッキ 加工の GEM を試作してその有用性につ いての検討を始めた。試作品の評価は、 管電圧 125kV のX線発生装置を用いて 行われた。試作とはいえ、検出器の有口 径は 15x15cm<sup>2</sup> あり、128x128 画素の 2次 元イメージを読み出すことのできる本 格的な画像システムとして組み上げら れている。これを一般的なテストチャー トを使って評価したものが、右の図であ



り、1mm 程度までの線幅が分離できる分解能があることを示すことができた。

X線の微細イメージングの取り組みとしてはシリコンピクセル検出器の可能性に ついても評価・検証を行った。KEKでは素粒子物理・崩壊点測定用検出器として SOI (Silicon On Insulator)技術を活用したセンサーを開発中であり、このタイプのデ バイスが、本プロジェクトで生成されるX線を使った微細イメージングへの活用可能性 について試作機を用いて具体的に評価を行った。

SOI 技術は、LSI の高速化と省電力化を実現するための半導体技術の一つで、ハンドルウェファーと呼ばれる厚いシリコン基板上にSiO<sub>2</sub>の絶縁層で隔てた薄いCMOSエレクトロニクスを積層するもので、今後の3D集積回路の基本形とも目される技術である。 このハンドルウェファーに高抵抗シリコンを用いて放射線センサーとして利用し、絶縁 層にあけた穴から信号をピックアップ、上層のCMOSエレクトロニクスでそれを増幅・ 処理が行えれば、センサーとエレクトロニクスが完全に一体化した理想的な放射線検出 器システムが実現する。次図にその概念を示す。 2008 年に試作されたチップ は20 ミクロン角の128 x 128 ピ クセルチップで、X 線信号を積 分して、その後画像イメージと して取り出すタイプ(積分型) と 60 ミクロン角の128 x 128 ピ クセルで、X 線のフォトンカウ ンティングが可能なチップ(カ ウント型)の2 種類で、特に後



者は CCD では実現できない様々な計測の可能性を秘めている。今年度から全チャンネル を処理することのできる評価ボードも完成し、画像装置としての性能評価が可能となっ た。実際に管電圧 35kV、Cu をターゲットとした X 線発生装置(~8keV)を使って行っ た、初めての画像評価の結果を次図に示す。線幅 25 ミクロンのパターンが分解できて いることがわかる。

このような評価実験を踏まえて、次年度以降この SOI ピクセルによる高精細 X 線検出 器の実用システム実現に向けさらに開発研究を続けていく予定である。



# 総括

前節の報告結果により超伝導加速器を用いる前段階の常伝導加速器による X 線実証が

達成された。実際の生成 X 線も実機とほぼ同程度のエネルギーであるために本結果によって得られた X 線は利用研究のためには強度は不足しているが、実機用の検出器の試験などに用いることが可能である。また、実機の設計への指針となる結果が得られている。 実際に X 線検出器評価試験では Si-PIN 半導体検出器が中性子に感度が大きく、また中性子のバックグラウンドが大きいことも確認できたため、実機では半導体検出器を避けるもしくは中性子遮蔽を強化するような構成にする必要があることを示した。

# H. 高周波超伝導空洞用入力カプラーの開発

#### 概要

次世代小型高輝度光子ビーム源の実現に向けて、1.3GHz連続(CW)高周波超伝導空洞 用入力カプラーの開発を開始した。要求される入力パワーは、CW超伝導空洞の加速勾配 20MV/mとビーム電流100mAに対して、エネルギー回収を行う運転では約20kWになる。入 力カプラーは、STF-BLの入力カプラーを基本として設計され、20kWの入力パワーに耐え るためにいくつかの改良がなされている。我々は、セラミック窓やベローズなどのカプ ラーのコンポーネントを製作し、30kWのIOT電源と大電力試験用に組み上げたテストス タンドを用いて大電力試験を行った。本報告では、主に入力カプラーの設計方針と大電 力試験の結果について述べる。

#### Abstract

We started to develop an input coupler for a 1.3GHz CW superconducting cavity to realize a next-generation compact high-brilliance photon beam source. Required input power is about 20kW for the cavity acceleration field of 20MV/m and the beam current of 100 mA in energy recovery operation. The input coupler is designed based on the STF-BL input coupler and some modifications are applied to the design for the CW 20kW power operation. We fabricated input coupler components such as ceramic windows and bellows and carried out the high-power test of the components by using a 30kW IOT power source and a test stand constructed for the high-power test. In this report, we mainly describe the design strategy of the input coupler for the 1.3GHz CW superconducting cavity and results of the high-power test.

#### 1. 開発目標

本研究は、1.3GHzCW 超伝導空洞用入力カプラーの開発である。想定されている CW 超 伝導空洞は最大加速勾配 20MV/m で、最大ビーム電流は 100mA である。入力カプラーに 投入されるパワーは、エネルギー回収を想定する。エネルギー回収の下、空洞の無負荷 Q 値 (Q<sub>0</sub>)は 2K にて 10<sup>10</sup> であり、回収ビームエネルギーが次のビーム加速にすべて使用で きるため、投入パワーは 20MV/m 加速勾配で空洞一台(長さ約 1m) あたり 40W 程度であ る。但し、実際の運転では外乱による影響(microphonics)などにより空洞が機械的振動 を受け、共振周波数に peak を保つことは難しい。従って、入力カプラーのカップリン グを変化させ、負荷 Q 値 (Q<sub>1</sub>)を小さくすることで共鳴幅を敢えて大きくさせ、機械的振 動に堅牢なパワーの安定供給を実現する必要がある。



図1:各Q<sub>L</sub>毎の共振周波数からの周波数変動(Δf)に対する入力パワー(Pg)の関係。

図1は20MV/m加速時の共振周波数からの周波数変動( $\Delta f$ )に対する入力パワー(Pg)をQL 毎に書いたグラフである。QLが高いと、周波数の変動( $\Delta f$ )が小さい時は投入パワーが少 なくてすむが、周波数の変化に敏感になる。考慮すべき周波数変動の幅はクライオモジ ュールの設計に大きく反映され、出来るだけmicrophonicsを減らす工夫が必要である。 海外のデータでは微小振動による周波数変動はクライオモジュール毎に異なり、r.m.s で0.6-7Hz、peak値で4-42Hz程度と言われている[1]。Microphonicsの小さなクライオモ ジュールも超伝導空洞の重要な開発項目であるが、入力カプラーの設計方針としては安 全を見て $\Delta f$ で50Hzまでの周波数変動を想定して、20MV/m運転時にQL=2×10<sup>7</sup>,最大入力パ ワー20kWを基本仕様とした。またQLに関しては空洞やカプラーのpulse conditioningな どが行えるよう、より小さいQLを実現できることを基本方針とした。表1に基本仕様を まとめた。

周波数	1.3GHz
加速勾配	最大20MV/m
入力電力	最大20kW
負荷Q値(Q1)	$5 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$ (可変)

表1:入力カプラーの基本仕様

エネルギー回収なしのパワー供給値2MWに対し、表1の入力パワーは1/100であるが、 パルス型超伝導空洞(最大加速勾配30MV/m、パルス幅1.5ms、繰り返し周波数5Hzのパル ス運転)用カプラーに比べて10倍の投入パワーが必要である。従って、パルス型超伝導 空洞に対して、10倍の発熱が予想され、その発熱の軽減、および空洞への入熱の軽減が 重要課題である。さらにパルス運転と違い、セラミック窓やベローズなど各コンポーネ ントからの2次電子の連続的放出などの抑制も重要課題である。以下、この基本仕様を 元に主加速器用の入力カプラーの具体的設計を述べる。また、今年度の成果としてカプ ラー試験用のテストスタンドの概要とそこでの試験結果の現状報告も行う。最後に現カ プラー製作の問題点と次年度への方針を示す。

## 2. 入力カプラーの設計

図2に入力カプラーの概念図を示す。具体的設計としては、1.3GHzにてパルス運転で の大電力試験の実績があるILC用STF-BL空洞の入力カプラーを基本とした[2]。セラミッ ク窓には500MHzで運転していたTRISTANやKEKBにて実績のあるトリスタンタイプの同軸 型窓を1.3GHz用に拡張して使用している。この点が採用を決めた理由の一つである。但 し、パルス運転のILCとは異なり、CWでは20kWのpower供給が要求されているため、熱負 荷の影響が大きく、いくつかの設計の改良を行った。主な変更点として、同軸部のイン ピーダンスを50Ωから60Ωにし、内導体の電力損失の軽減を行った。また、セラミック 窓の材質も誘電損失の少ない99.7%純度のアルミナセラミックス(HA997)を窓材に採用 した。大気中から真空中にRFを導入するセラミック窓は空洞への粉塵混入を避けるた め低温部(cold窓)と高温部(warm窓)の2つを設け、特に製作の簡便性から2つを同一寸 法とした。表2は20kWパワー投入時のdynamic lossである。導体は熱侵入を減らすため、 1mmのSUSに10µmの銅鍍金を施した。パルス超伝導空洞用入力カプラーと比べてRF投入時 のdvnamic lossが圧倒的に大きく、60Ωのインピーダンスにしても外導体の発熱で7.7W、 内導体の発熱で20.8Wになっている。セラミック窓の発熱はHA997を採用することにより 一枚あたり1Wに抑えている。これらの冷却のために、低温側の内導体の熱負荷はcold 窓80Kの温度定点をセラミック窓に設け、さらに低温側に5Kの温度定点を設けることで、 2Kの超伝導空洞への熱侵入を0.3W程度に軽減することが可能な設計となっている。また、 常温側は内導体内部にロッドを挿入し、強制空冷により冷却する。



図2:入力カプラーの概念図。

内導体発熱	20.8W(Total)(80Kで吸収)	
外導体発熱	4.5W (80K)	3.2W (5K)
セラミック窓発熱	1₩(一枚当たり)(HA997使用)	

表2: dynamic lossの計算(20kW投入時)

図3はカプラーに用いる同軸型セラミック窓の電場分布のHFSSによる計算結果であ る。内導体、外導体にはchokeが施され、セラミックの内外導体部分とのロウ付部分に 直接電場が立たないようにしているとともに、セラミック窓からの反射を軽減している。 HA997の誘電率  $\varepsilon$  が10で、カプラーのインピーダンスが60  $\Omega$  であるため、STF-BLのchoke 部の長さや深さを変更し、結果として、反射(S11)を-25dB程度に抑えた設計になってい る。負荷Q値( $Q_1$ )を5×10<sup>6</sup>~2×10<sup>7</sup>まで可変とするために低温部の外導体にベローズを 設け、内導体を可動にした。図4は空洞に対する内導体の位置(L\_port1)と $Q_1$ の関係を 計算したものである。可動範囲を空洞軸中心から50~60mm程度に設定することで、 $Q_1$ が 5×10<sup>6</sup>~2×10<sup>7</sup>で可変となるのがわかる。従って我々の設計ではベローズの可動範囲を ±5mmに設定することとした。

Q値(Q<sub>L</sub>)を可変とするためのベローズ以外に、低温に冷やしていくときに起こる熱収 縮を吸収するためのベローズをcold窓とwarm窓の間の内導体、外導体にそれぞれ設ける。 内導体での発熱による温度上昇は特にベローズ部分で大きく、ロッドによる強制空冷が 必須となる。なお、このロッドにてカプラーの可動を行う設計としている。



図3:セラミック窓のS11,S12の計算。

図4:カプラーの挿入位置 vs Q の計算。

### 3. カプラーテストスタンドでの大電力試験

入力カプラーの設計上、避けて通れないのが、セラミック窓やベローズの出来不出来 である。これらコンポーネントの試験を行うべく、今年度はカプラー用のテストスタン ドの製作を行い、セラミック窓およびベローズの単体性能評価を行った。



図5:カプラーテストスタンドのセットアップ。

図5にテストスタンドのセットアップを示す。1.3GHzの最大30kWのIOTを用いて、大 電力試験を行う[3]。特にセラミック窓の試験がCW運転時に近い形で行えるように、中 心にcold窓を据え、その両側をwarm窓で挟んだ3連のセラミック窓のスタンドとなって いる。大電力試験として重要となる発熱や温度上昇を見積もるため、cold窓は実際の状 況と同じく断熱槽内部におかれ、なおかつ液体窒素による冷却を行い80Kの温度定点を cold窓に設けられる設計である。このスタンドを用いることでwarm窓とcold窓の大電力 試験と冷却テストを超高真空中で行えるような設計とした。温度上昇を見るため、外導 体だけでなく、内導体にも熱電対を設置し、特にベローズの温度上昇をモニターできる ように設計を行った。内導体にはカプラー設計と同じくロッドを設け、内導体内部の空 冷が行えるシステムとなっている。Warm窓の大気側からドアノブ変換器にて導波管に変 換し、一方からパワーを投入し、他方は位相器と端板またはダミーロードを設けている。 IOT直後に1つ、スタンドの前後に1つずつ合計3つの方向性結合器にて入力パワーの 透過と反射を常時モニターする。我々は今年度、図6に示したcold窓とベローズ付の warm窓の製作を行った。ベローズの銅メッキのはがれやセラミック及びベローズの傷等 はなく、ロウ付けの状態も良好であった。これらをクラス6の環境下にて、セラミック 窓は超純水洗浄、外導体は高圧超純粋洗浄を行った。図7は、組み立てたテストスタン ドの写真である。ドアノブを含む3連セラミック窓のlow level測定では、ドアノブと warm窓の距離を調整し、-23dBの反射を実現し、simulation結果と比較しても反射は特 に大きな問題がない結果であった。



図6: cold 窓(左写真)と warm 窓(右写真)。 図7:カプラーテストスタンド。

次に大電力試験の結果を示す。まず、常温時での熱負荷の状況を見るべく、断熱槽が ない状態にてセラミック窓3連の状態の 20kW の進行波の大電力試験を行った。内導体 のベローズの温度上昇が大きいと思われるため、空冷の効果を調べることも行った。図 8は空冷ありなしでの内導体の温度上昇の比較を測定したものである。投入パワー1kW に対し、室温20度からベローズの温度上昇は空冷なしで∠T=16度であったのに対し、 内導体の空冷(流量=601/min)を施したところ∠T=4度であった。これは、図9に示す空 冷ありなしの計算結果(空冷なしで/T=25K、空冷ありで/T=4K)とおよそ一致しており、 ベローズの温度上昇の抑制がスムーズに行われていることを示している。





図8:カプラーパワー投入時のベローズの温度 図9:内導体空冷ありなしでの温度上 上昇。緑がベローズ中央の温度上昇を示してい 昇の比較計算。(上)空冷なし、(下) る。Air in は空冷開始の時刻を示す。

空冷あり。



図10:カプラースタンド大電力試験時の様子。左のグラフは黒が投入パワー(左軸)、茶色、赤色、緑 色がそれぞれ上流 warm 窓、cold 窓、下流 warm 窓の温度(右軸)を示したものである。右のグラフは温 度は同じだが、黒がカプラースタンドに入力したパワーと透過したパワーの比(左軸)を示したもので ある。

この結果にてベローズの温度上昇の抑制も行えていることから、次 20kW までパワー を投入することを試みた。図10は20kWを投入した際の cold 窓及び warm 窓の温度上昇 を示したものである。左グラフ中の赤い破線で示す cold 窓の温度が 8kW のパワー投入 から急激に上昇していることが判明した。室温 20 度に対し、cold 窓の温度は 80 度以 上になっている。この原因は右グラフに示すように投入パワーの透過率が少なくなって いることと相関があり、3連のカプラー窓を通過する際に何らかのパワーロスが生じ、 cold 窓にて急激な温度上昇を起こしている。3回大電力試験を行ったが同じく cold 窓 の急激な温度上昇とパワーロスの相関がみられ再現性は確認された。



0.21290 1305 1310 0.4 0.6 (BP) 0.8 70度 521 -1 20度 .1.2 2008/11/28 18:35 2008/11/28 18:37 .1.4 2008/11/28 20:35 .1.6 1.8 Frequency (MHz)

巻いた様子。

図 11:カプラースタンド cold 窓にヒーターを 図 12:ヒーターの温度に対する S21 の周波数 変化測定結果。

次に、セラミック窓の温度がある温度(50~60度)以上になると急激な温度上昇が見ら れる傾向があったため、セラミック窓の温度を意図的に変化させた際にカプラー3連+ ドアノブのS-parameterがどのように変化していくのかを詳細に測定することを試みた。 図11がその際のセットアップである。具体的にはヒーターをcold窓に巻いて意図的に 温度上昇をおこし、S-parameterの測定を行った。図12が測定結果である。反射は-30dB 以下と非常に良好な特性を示していたが、透過を示すS21を詳細に見ると図12に示す ように1.305GHz付近にpeakが見られることがわかった。温度を上げていくとこのpeak が1.3GHzに近づいていくことから、このpeakが温度上昇によりパワーロスを誘起するも のと考えられる。

このような状況下、カプラースタンドを一度解体した。そこで図13に示すように cold 窓のセラミック窓が割れているのが判明した。特に内導体の銅メッキが完全に酸 化しており、想像以上の温度上昇(200度程度)が内導体で起こったものと予想された。 但し、warm 窓やベローズは特にメッキの劣化やセラミックの割れなどは見つからなか った。内導体部の熱が想像以上に大きく、セラミックを通じて冷却を行ってもその温度 勾配がきわめて大きいものであったようである。





図 13: 大電力試験後の割れた cold 窓。

図 14:割れた cold 窓(上)と下流部 warm 窓 (下)の low level 測定結果(S21)。

その原因を探るべく cold 窓単体、および warm 窓 2 つの単体の low level 測定を行え る冶具を別途製作し、個別に RF 特性を測定した。図 1 4 がその結果である。割れた cold 窓、および warm 窓 2 つのうち、割れた cold 窓と下流の warm 窓の S21 が図 12 と同様に 1.305GHz の急峻な peak を持つことが判明した(図14中の橙色の円内)。この peak は HFSS や MW-Studio による RF simulation では現れないものであり、原因はまだ特定 されていない。窓の choke 部分や内導体の設置誤差などから生じている可能性もあり、 その誤差を入れた計算の評価を現在行っている。また割れた窓での low level 測定を引き続き行い、窓のどの部分がこの peak を誘起するかを現在調査中である。

### 4. まとめと今後

今年度は、20kW 用の入力カプラーの設計を行い、セラミック窓とベローズの試作を 行った。また、試作したセラミック窓等の評価を行うため、カプラーテストスタンドを 構築し、常温下でセラミック窓およびベローズの大電力試験(最大入力パワー20kW)を 行った。ベローズの温度上昇の抑制は概ね良好であり、計算とも良い一致を示していた。 それに対し、2種類のセラミック窓の1つ(cold 窓)で急激な温度上昇が見られ、結果 的に cold セラミック窓が割れる結果となった。その後、窓単体の詳細な low level 測 定を行い、セラミック窓の構造に起因する 1.305GHz 付近の吸収 peak が存在すること、 およびそのピークが温度上昇により 1.3GHz に近づいてくることが判明した。これらの 結果から想定するに、この peak が急激な温度上昇の元と考えられる。従って、次年度 はその原因究明を早急に行い cold 窓の設計を修正し、新たな cold 窓を製作する。また、 その後に今年度製作した断熱槽内で内導体にヒーターを設置してそのセラミック窓の 熱評価を行う。cold 窓はクライオモジュールへの入熱を抑えるために断熱槽内で液体 窒素にて 80K に冷却して使用される。そのため、断熱槽内に窒素溜めを用意し、それに よりセラミック窓を冷却して試験を行う。さらに、warm 窓 2 つについては真空下での 大電力試験を行い、2 次電子放出などの測定を試みる予定である。

#### 開発スタッフ

責任者:中村典雄

担当者:阪井寛志、篠江憲治、石井篤、高木宏之、渋谷孝、工藤博文、伊藤功

#### 参考文献

- [1] M.Liepe, et. al, Nucl. Instr. Meth. A557, p354-369 (2006).
- [2] 加古永治,他:「STFベースライン超伝導空洞用大電力高周波入力結合器」,第3回加速 器学会プロシーディング, p136-138 (2006).
- [3] 沢村勝:「IOT高周波出力特性」,第3回加速器学会プロシーディング, p832-834 (2006).

# I. X線測定および利用研究

#### 概要

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のために、レーザ蓄積装置と常 伝導の加速器を用いた X 線の生成試験、X 線検出器試験、および利用研究に向けた検討を行 っている。本年度はレーザ蓄積装置と高エネルギー加速器研究機構・先端加速器試験施設 内に設置したマルチバンチ電子ビーム生成加速器によるレーザコンプトン散乱 X 線生成の 実証試験を行い、実際に本プロジェクトのターゲットとするエネルギー付近の X 線を生成 するとともに様々な X線検出器の評価試験を行った。X線の測定としては、シンチレーター 検出器・半導体検出器・マイクロチャネルプレートをほぼ同運転条件で比較することによ ってそれぞれのバックグラウンド感度などを比較した。また、ブラッグ反射板を用いた検 出器システムを構築し、レーザコンプトン散乱 X 線としては世界で初めて加速器バックグ ラウンドと分けて X 線を検出し、格段の S/N の向上を確認するとともに反射角度から生成 X 線のエネルギーも計測した。本成果は実際の利用の際にも大いに役立つことが予想される。 本年度の最も重要な成果はレーザ蓄積装置とマルチバンチ電子ビームによってマルチパル ス構造の X 線生成を実証し、X 線生成・検出システムの問題点を洗い出したことにあり、次 年度以降の超伝導加速器と組み合わせる際の指標を示すことができた。次年度は位置読み 出し型(撮像型)の検出器の評価を行っていくとともにその成果から実機での利用研究に 関しても検討を行う。

#### Abstract

We are developing an X-ray property measurement system for a super-conducting linac based laser-Compton X-ray source and studying about its application researches. We have demonstrated multi-pulse laser-Compton X-ray generation using a laser super-cavity and a multi-bunch electron beam produced by normal-conducting linac at KEK-LUCX. The produced X-ray flux was quite low but the energy is almost same with the target of this research project. Therefore this X-ray can be used for an X-ray detector evaluation tests. We have already measured a background sensitivity of a scintillation detector, a semiconductor detector, and a micro-channel plate. Moreover, we have firstly applied a Bragg reflector for laser-Compton X-rays in order to separate X-ray from background. This system was successfully performed to increase S/N ratio and produced X-ray energy was measured by the reflecting angle of Bragg reflector. The most contributive result was the first demonstration of multi-pulse X-ray generation system; this will be a milestone towards the realization of a compact high brightness X-ray source based on super-conducting linac.

## 1. はじめに

X線は医療、生命科学、材料科学など広い分野で利用されている。特に高輝度高品質なX線は先端的な計測などに利用され多大な成果をあげている。しかしながらこのような高輝度なX線は現状、大型放射光施設から得ており利用が限られている。本プロジェクトでは

このような高輝度 X 線ビームを小型な施設によって生成することを目標とする。

実機では超伝導加速空胴によって加速された電子バンチを用いるがその前段階として常伝 導加速器から得られるマルチバンチ電子ビームとレーザ蓄積装置を用いることで原理実証 試験を行い、今後の本プロジェクトの指針とするべく研究を進めている。この実証試験に おいて得られた知見は X 線検出器のみならず加速器やレーザ蓄積装置、トータルとしての X 線生成システム構成に至る全ての分野で指針となる結果が得られる点で重要な研究開発項 目である。

#### 2. マルチパルス X 線実証試験

常伝導線形加速器とレーザ蓄積装置を用いた X 線生成実証試験は高エネルギー加速器研 究機構、先端加速器試験室内に設置された小型加速器(LUCX)にて行った。以下の図 1 にそ の構成図、図 2 に衝突点付近のレイアウト図を示す。



図 1: LUCX 加速器構成図

LUCX 加速器は電子源であるフォトカソー ド RF 電子銃と 3m の線形加速管から構成され、 ビームエネルギー約 40MeV の 100Bunch/Train マルチバンチビームを生成可能である。レー ザ蓄積装置との相互作用点は 2 つの四極電磁 石によって収束された位置に設置されてお り、その後電子ビームは偏向電磁石で地面方 向にダンプされ、生成した X 線は Be 窓を通 して大気中に取り出される。

まずマルチパルス X 線実証試験として以下の 図 2 に示されるシンチレーション検出器を用 いて測定を行った。シンチレータとしては厚 さ 150 µ m の LYSO (Lu<sub>2(1-x)</sub> Y<sub>2x</sub>SiO<sub>5</sub>:Ce)を用いて おり、シンチレーション光を光電子増倍管に よって増幅して検出する。このシンチレータ の厚さは低エネルギーの光子を効率よく検出 できるよう計算機シミュレーションによって 最適化している。シンチレーション検出器の



図 2:シンチレーション検出器構成図

直前には鉛コリメータを設置し、生成 X 線の中心部分のみを切り出して検出する構成になっている。

これによって検出された X線の信号を以下の図3と図4に示す。



図3のタイミングプロットは衝突レーザのタイミングをスキャンした際のバックグラ ウンドを差し引いたプロットで衝突が達成していないタイミングではゼロを示し、実際 に衝突が達成されている際には最大約1500Countの信号が得られている。この時間幅は レーザと電子ビームの時間幅に依存しており、約7.5ps(rms)と予想通りの値が得られて いる。また、図4は実際にX線の強度がレーザ強度に対して線形に変化していることを 示している。これらの図3と図4より実際にこのX線がレーザコンプトン散乱によって 生成されたものであると確認できる。

時間分解能の高いマイク ロチャネルプレート(MCP) を用いて実際に 100Pulse/Trainの信号を 検出した結果を図5に示す。 実際に2.8 nsec 毎に100 パルスのX線が生成されて いることが確認できる。実 際に検出されたX線の光子



数は 1.65×10<sup>2</sup> 図 5: MCP によって検出された 100Pulse/Train X 線 Photons/Train であり、計算機シミュレーション CAIN による計算結果の 2.0× 10<sup>2</sup>Photons/Train にほぼ一致する。

### 3. X線検出器評価試験

本課題ではまずブラッグ反射板を用いた X 線検出器を試験した。その検出器の構成図 を以下の図 6 に示す。反射板としては HOPG (Highly Oriented Pyrolytic Graphite)を用い、X 線とバックグラウ ンドを分けるよう構成されている。こ れはレーザコンプトン散乱 X 線として は世界初の試みである。 図 6: ブラッグ反射型検出器構成図



実際に検出した X 線のタイミングプロット・レーザー強度プロットを以下の図 7 に示 す。前節同様にレーザコンプトン散乱の予想する通りの結果が得られている。



(左図:タイミングプロット 右図レーザ強度依存プロット)

X線検出器としては上記シンチレーション検出器・MCPの他にSi-PIN半導体検出器を 用意した。そこでマルチパルスX線検出器として最適なものを特定するためにそれぞれ の検出器におけるS/Nを評価した。

表1:検出毎のS/N評価試験結果

	S/N	レーザー強度
シンチレーション検出器(直接検出)	1/4	40.6kW
シンチレーション検出器(ブラッグ反射)	1.98	32kW
MCP(直接検出)	1/1.3	30kW
Si-PIN(ブラッグ反射)	1/3	24. 2kW

表1を見て分かるようにブラッグ反射を用いることで約8倍のS/Nの向上が確認された。 実際に検出器として最適なものとしてはMCPがシンチレーション検出器よりも約3倍良 いことがわかる。また、Si-PIN半導体検出器はバックグラウンド、特に中性子によるバ ックグラウンドに感度が高く、直接検出は達成できずブラッグ反射を用いて評価したと ころシンチレーション検出器よりも6倍悪いS/Nという結果であった。しかしながら半 導体検出器はエネルギー分解能が高いという利点があるため、今後中性子遮蔽を強化す るなどの対策をとりさらなるS/Nの改善を予定している。

### 4. X線エネルギー測定試験

図6に示したブラッグ反射板を用いた検出器はそのブラッグ反射の特徴から反射角を 測定することによってX線のエネルギー測定、つまりスペクトロメーターとしても利用 することができる。ブラッグ反射板の角度に対する反射率の測定をそれぞれの電子ビー ムエネルギーで行った結果を図8に、その結果から得られたX線のエネルギー測定の結 果を図9に示す。





図 9:X線エネルギー測定結果

X線を効率よく反射する角度がビームエネルギーを上げることによってより浅い角度 にシフトしていることがわかる。また、実際に測定されたX線のエネルギーもレーザコ ンプトン散乱が予測するものとよく一致し、この結果からも実際にレーザコンプトン散 乱X線を検出していることが確認できる。

## 5. 総括

前節の報告結果により超伝導加速器を用いる前段階の常伝導加速器によるX線実証が 達成された。実際の生成X線も実機とほぼ同程度のエネルギーであるために本結果によ って得られたX線は利用研究のためには強度は不足しているが、実機用の検出器の試験 などに用いることが可能である。また、実機の設計への指針となる結果が得られている。 実際にX線検出器評価試験ではSi-PIN半導体検出器が中性子に感度が大きく、また中 性子のバックグラウンドが大きいことも確認できたため、実機では半導体検出器を避け るもしくは中性子遮蔽を強化するような構成にする必要があることを示した。加速器設 計に関してはマルチバンチ加速に対して以下のような結果が得られている。

図10はパルス毎にX線を検出しつつ衝突タイミング依存の測定を行った結果である。

Y 軸の Bunch Number は値が小さいほど前方 のバンチを用いて生成した X 線であること を示している。図から見て取れるようにバン チ毎に最適な衝突タイミングがシフトして いることがわかる。これはマルチバンチビー ム加速の際のビームローディング補正が不 十分であったためにバンチ間隔にずれが生 じ、引き起こされた現象である。実機ではさ らに長いトレインを用いるため、この効果は



さらに顕著になり補正が必須であることを示した。 図 10: パルス毎のタイミング依存 今後さらに詳細に検討を行うことにより、さらなる実機に対する指針を与えると共に X線検出器グループと緊密に連携し、本X線を実機用X線検出器開発に活用していく予 定である。

#### 6. 開発スタッフ

責任者 : 鷲尾方一(早稲田大学)担当者 : 鷲尾方一(早稲田大学)

### 7. 参考文献(2008年度中の発表および掲載論文)

[1]."Recent Progress of a Soft X-ray Generation System based on Inverse Compton Scattering at Waseda University" Radiation Physics and Chemistry, Vol. 77, Issue 10-12, pp.1136-1141, October-December 2008, Kazuyuki Sakaue, Tomoko Gowa, Hitoshi Hayano, Yoshio Kamiya, Shigeru Kashiwagi, Ryunosuke Kuroda, Akihiko Masuda, Ryo Moriyama, Junji Urakawa, Kiminori Ushida, Xijie Wang and Masakazu Washio

[2]. "Development of Pulsed-Laser Super-Cavity for Compact X-Ray Source Based on Laser-Compton Scattering" Proceedings of European Particle Accelerator Conference 2008, TUPP156, pp.1872-1874, Jenova, June 2008, Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Yasuo Higashi, Yosuke Honda, Takashi Taniguchi, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Noboru Sasao, Mikio Takano

[3]. "Design of LINAC Based Compact X-ray Source via Inverse Compton Scattering at Waseda University", A. Masuda, T. Gowa, C. Igarashi, T. Kashino, N. Mitsuda, K. Sakaue, M. Washio, R. Kuroda, S. Kashiwagi, H. Hayano, J. Urakawa, K. Ushida, 11<sup>th</sup> European Particle Accelerator Conference (EPAC'08), MOPC043, 2008.6.23-27, Genoa, Italy

[4]. "Development of Laser System for Compact Laser Compton Scattering X-ray Source", R. Kuroda, H. Toyokawa, M. Koike, K. Yamada, T. Gowa, A. Masuda, K. Sakaue, M. Washio, S. Kashiwagi, T. Nakajyo, F. Sakai, EPAC'08, TUPP158, 2008.6, Genoa, Italy

[5]. "Compact EUV Source Based on Laser Compton Scattering between Micro-bunched Electron Beam and CO2 Laser Pulse", S. Kashiwagi, R. Kato, G. Isoyama, R. Kuroda, J. Urakawa, K. Sakaue, A. Masuda, T. Nomoto, T. Gowa, M. Washio, EPAC'08, TUPP155, 2008.6, Genoa, Italy

[6]. "Present Status of Developing High Luminous Compact Soft X-ray Source via Multipulse Inverse Compton Scattering", A. Masuda, T. Gowa, C. Igarashi, N. Mitsuda, K. Sakaue, M. Washio, R. Kuroda, S. Kashiwagi, H. Hayano, J. Urakawa, K. Ushida, The 2<sup>nd</sup> Asia Pacific Symposium on Radiation Chemistry(APSRC-2008), 2P-29, 2008.8.29-9.1, Tokyo, Japan

[7]. "Evaluation of a Chemically Amplified Photo Resist for Nanoscale Soft X-ray Imaging", T. Gowa, T. Kashino, A. Oshima, T. Urakawa, C. Igarashi, A. Masuda, M. Washio, R. Kuroda, S. Kashiwagi, K. Ushida, APSRC-2008, 1P-10, 2008.8, Tokyo, Japan

[8]. "Development Compact Coherent EUV Source Based on Laser Compton Scattering", S.

Kashiwagi, R. Kato, G. Isoyama, K. Sakaue, A. Masuda, T. Nomoto, T. Gowa, M. Washio, R. Kuroda, J. Urakawa, M. Kuriki, APSRC-2008, 2P-31, 2008.8, Tokyo, Japan

[9]. "Demonstration of a Multi-Pulse X-ray Generation via Laser-Compton Scattering Using Pulsed-Laser Super-Cavity" Proceedings of LINAC Conference 2008, TUP065, Victoria, September 2008, in press, Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Yasuo Higashi, Yosuke Honda, Takashi Taniguchi, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Noboru Sasao [10].「KEK 小型電子加速器におけるレーザー蓄積装置を用いた小型X線源(LUCX)の開発(5)」 日本物理学会 第63回年次大会 東大阪 2008年3月 坂上和之, 鷲尾方一, 荒木栄, 浦川順 治, 谷口敬, 照沼信浩, 東保男, 福田将史, 本田洋介, 笹尾登, 横山弘和, 武藤俊哉, 高野幹男

[11].「早稲田大学における逆コンプトン散乱を用いた水の窓軟X線源の開発」,五輪智子, 五十嵐千明,樫野多加志,坂上和之,増田明彦,鷲尾方一,浦川順治,早野仁司,黒田隆 之助,柏木茂, 丑田公規,第63回日本物理学会年次大会,26aZL-9,2008.3,大阪 [12].「早稲田大学における Cs-Te フォトカソード RF-Gun の現状」,村田亜希,五十嵐千 明,樫野多加志,加藤雄太,小宮圭太,五輪智子,坂上和之,鈴木達也,野本知章,濱義 昌,広瀬立成,藤田晃宏,増田明彦,鷲尾方一,浦川順治,栗木雅夫,高富俊和,工藤昇, 照沼信浩,早野仁司,柏木茂,神谷好郎,黒田隆之助,第63回日本物理学会年次大会,23aZL-9, 2008.3,大阪

[13].「早稲田大学における逆コンプトン散乱 X 線源のマルチパルス化計画と進捗状況」, 五十嵐千明,大島明博,五輪智子,坂上和之,濱義昌,増田明彦,鷲尾方一, 丑田公規, 浦川順治,早野仁司,柏木茂,黒田隆之助,第45回アイソトープ・放射線研究発表会,2a-Ⅲ-04,2008.7,東京

[14].「早稲田大学における Cs-Te フォトカソード RF 電子銃の現状」,鈴木達也,五十嵐 千明,浦川順治,樫野多加志,柏木茂,加藤雄太,黒田隆之助,小宮圭太,五輪智子,坂 上和之,高富俊和,照沼信浩,野本知章,浜義昌,早野仁司,広瀬立成,藤田晃宏,増田 明彦,村田亜希,鷲尾方一,第45回アイソトープ・放射線研究発表会,2a-Ⅲ-03,2008.7, 東京

[15].「パルスレーザー共振器とマルチバンチ電子ビームを用いたレーザーコンプトン散乱 X 線生成」第 5 回加速器学会年会・第 33 回リニアック技術研究会プロシーディングス in press 広島 2008 年 8 月 坂上和之, 鷲尾方一, 荒木栄, 浦川順治, 谷口敬, 照沼信浩, 東 保男, 福田将史, 本田洋介, 武藤俊哉, 笹尾登

[16].「早稲田大学における逆コンプトン散乱 X 線源のマルチパルス化計画と進捗状況」, 五十嵐千明,五輪智子,坂上和之,濱義昌,増田明彦,満田直哉,鷲尾方一,丑田公規, 浦川順治,早野仁司,大島明博,柏木茂,黒田隆之助,第 5 回日本加速器学会年会・第 33 回リニアック技術研究会,TP059, 2008.8,東広島

[17].「早稲田大学における Cs-Te フォトカソード RF 電子銃の現状」,鈴木達也,五十嵐

千明, 浦川順治, 柏木茂, 加藤雄太, 神谷好郎, 栗木雅夫, 黒田隆之助, 五輪智子, 坂上 和之, 高富俊和, 照沼信浩, 野本知章, 濱義昌, 早野仁司, 広瀬立成, 藤田晃宏, 増田明 彦, 村田亜希, 鷲尾方一, 第5回日本加速器学会年会・第33回リニアック技術研究会, TP121, 2008.8, 東広島

# J. 電子ビーム・レーザ衝突技術の開発(システム統合化) とプロジェクトの総合的推進

### 概要

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のために、レーザ蓄積装置 と常伝導の加速器を用いた X線の生成試験および利用研究に向けた検討を行っている。 本年度はレーザ蓄積装置と高エネルギー加速器研究機構・先端加速器試験施設内に設置 したマルチバンチ電子ビーム生成加速器によるレーザコンプトン散乱 X線生成の実証 試験を行い、実際に本プロジェクトのターゲットとするエネルギー付近の X線を生成し た。また、新 RF Gun 電子源の設計と製作を行った。5MeV 大強度電子ビームとレーザパ ルスを高繰り返しで衝突させて、レーザ逆コンプトン散乱で軟 X線生成実験が行えるよ うに、放射線管理区域変更申請を行い計画が認められた。さらに、ビームシュミレーシ ョンによって 10μC電子ビーム生成が可能である結果を得た。レーザパルス蓄積装置開 発では、低出力レーザ発振器を使って入射レーザエネルギーの 10 万倍の蓄積に成功し た。

#### 1. はじめに

X線は医療、生命科学、材料科学など広い分野で利用されている。特に高輝度高品質 なX線は先端的な計測などに利用され多大な成果をあげている。しかしながらこのよう な高輝度なX線は現状、大型放射光施設から得ており利用が限られている。本プロジェ クトではこのような高輝度X線ビームを小型な施設によって生成することを目標とす る。実機では超伝導加速空胴によって加速された電子バンチを用いるがその前段階とし て常伝導加速器から得られるマルチバンチ電子ビームとレーザ蓄積装置を用いること で原理実証試験を行い、今後の本プロジェクトの指針とするべく研究を進めている。こ の実証試験において得られた知見は加速器やレーザ蓄積装置、トータルとしてのX線生 成システム構成に至る全ての分野で指針となる重要なものである。

#### 2. マルチパルス X線生成実証試験

常伝導線形加速器とレーザ蓄積装置を用いた X 線生成実証試験は高エネルギー加速 器研究機構、先端加速器試験室内に設置された小型加速器(LUCX)にて行った。以下の図 1 にその構成図、図 2 に衝突点付近のレイアウト図を示す。



#### 図1:LUCX 加速器構成図

LUCX 加速器は電子源であるフォトカソード RF 電子銃と 3m の線形加速管から構成さ

れ、ビームエネルギー約 40MeV の 100Bunches/Train マルチバンチビ ームを生成可能である。レーザ蓄積 装置との相互作用点は 2 つの四極 電磁石によって収束された位置に 設置されており、その後電子ビーム は偏向電磁石で地面方向にダンプ され、生成した X 線は Be 窓を通し て大気中に取り出される。



#### 2: 衝突点付近の構成図

まずマルチパルス X 線実証試験として以下の図 2 に示されるシンチレーション検出 器を用いて測定を行った。シンチレータとしては厚さ 150  $\mu$  m の LYSO(Lu<sub>2(1-x)</sub> Y<sub>2x</sub>SiO<sub>5</sub>:Ce)

を用いており、シンチレーション 光を光電子増倍管によって増幅し て検出する。このシンチレータの 厚さは低エネルギーの光子を効率 よく検出できるよう計算機シミュ レーションによって最適化してい る。シンチレーション検出器の直



前には鉛コリメータを設置し、生成 X線の中心部分のみを切り出して検出する構成になっている。



これによって検出された X線の信号を以下の図 3・4 に示す。



図 3 のタイミングプロットは衝突レーザのタイミングをスキャンした際のバックグ ラウンドを差し引いたプロットで衝突が達成していないタイミングではゼロを示し、実 際に衝突が達成されている際には最大約 1500Counts の信号が得られている。この時間 幅はレーザと電子ビームの時間幅に依存しており、約 7.5ps(rms)と予想通りの値が得 られている。また、図 4 は実際に X 線の強度がレーザ強度に対して線形に変化している ことを示している。これらの図 3・4 より実際にこの X 線がレーザコンプトン散乱によ って生成されたものであると確認できる。

## 3. 新 RF Gun 電子源の設計と製作

新 RF Gun 空洞設計を行い、空洞製作を開始した。設計では無負荷 Q 値を 15%程度上 げかつ 0-mode と $\mu$ -mode の周波数差を 8.6MHz まで拡げることができた。これによって 加速電界を上げかつ生成電子ビームエミッタンスを小さくできる可能性が期待できる。 今後、2009 年 6 月に空洞を完成させ 10 月までに性能評価を電子ビーム生成とビーム品 質診断によって確認する予定である。一方、電子ビーム生成シミュレーションによって、 この光高周波電子源で 10 $\mu$ C、5.6 $\mu$  sec、4.5MeV の multi-bunch 電子ビーム生成が可能

であることを図5のよ うに示した。ただし、 電子ビーム生成実験を 2009 年秋に行うので あるが、放射線安全管 理上の制限により数 µCの電子ビーム生成 が上限になると思われ る。電子ビームの品質 が十分に良ければ、ビ ームダンプまでに発生 するビームロスを少な



図 5 Beam Loading 補正と ASTRA Code による 電子ビーム生成シミュレーション結果

くでき、放射線管理申請変更により  $10 \mu C$ 、5. $6 \mu \sec$ 、4.5MeV ビーム生成加速も認めら れるようにできる可能性がある。

# 4. レーザパルス蓄積装置開発

図6は光学定盤上に構築した4鏡共振器 試験システムである。この装置を用いて、 共振器の連続発振レーザに対する特性を測 定した。その結果近接した二つの共振状態 の存在を確認した。4鏡共振器において水平 方向と垂直方向の集光点を一致させるため には共振器の鏡を立体的に配置しなければ ならない。その結果として、レーザの右偏向 と左偏向状態の共鳴点が分離することが知 られており、本試作機においてもそれを明 確に観測した。共振器に直線偏光したレー ザを入射した場合の共振特性を図7に示す。 近接した二つのピークはそれぞれ、直線偏 光レーザ中の右偏向、左偏向成分の共鳴に 対応している。我々は、この特性が共振器 の共鳴信号に利用可能であることを見い出 し、その試験を行った。共鳴信号を取り出す ための光学系を図8に示す。直線偏光のレ ーザを入射した際の共振器からの透過光中 の左右偏向線分を分離し、その差分をとる ことにより、共鳴状態の情報を得ることが できる。図9は実際に観測された共鳴信号 であり、予想と一致している。この方法の 光学共振器の共鳴信号の構築は本開発研究 において見いだした新たな知見である。ま た、立体配置の4鏡共振器内におけるレー ザの伝搬状態についての解析方法を確立し た。現在、計算結果と実測値を比較するた めに、共振器内におけるレーザの集光状態 を実測する方法に関する開発を進めている。



図 6. 4 鏡共振器試験セットアップ



図 7. 4 枚鏡の直線偏向レーザーに対する 共振特性。二つのピークはそれぞれ右偏向、 左偏向成分の共振に対応する。



図 8 左右偏向を用いた共鳴信号取り出し のための光学構成

## 5. レーザと電子線によるγ線生成実験

2枚鏡ファブリペロー型共振器を用いたy線生成実験を行い、実際の加速器運転下に
おける共振器の動作とレーザ・電子散乱に **Tek** よるγ線生成の実証を行った。

図 10 は, KEK-ATF に導入した 2 鏡共振 器である。平成 20 年度で、入射レーザ 7W に対し、最大 490W をレーザ蓄積装置共振器 に蓄積することに成功した。また一回のレ ーザと電子バンチの衝突において 28 個の γ線を生成することに成功した。

本研究開発は本業務開始以前より,遂行 していたものであるが,その結果は,本業 務におけるレーザ蓄積装置開発の基礎技術 であり,本業務に直結するため,関連する 成果として報告する。





### 6. 新レーザパルス蓄積

レーザ増幅効率を高め、レーザ 蓄積の安定化を実現するために 下図に示す周回発振型レーザ蓄 積法の試験を行った。これは新し い方法であり、レーザシステムの

信頼性と低価格化に寄与する技術である。



図 10 KEK-ATF に導入された 2 鏡共振器



試験結果から、反射率 99.99%の共振器鏡の場合で蓄積光強度を評価してみる。励起 LD

の駆動電流 700mA の場合、出力カプラーの forward ポートに平均 735µW の出力が得られた。出力カプラーの透過率から評価すると、出力カプラー入口での強度は 9.2mW である。ファイバ再入力の効率が 60%とすると、共振器透過光の強度は 15.3mW である。ここで用いた公称 99.99%の共振器鏡は、REO 社のデータシートによると、透過率 0.006%(at1064nm), 0.007%(at1040nm)である。Yb の発光ピークである 1040nm での値で代表して考えると、共振器内部から鏡へ向かって来る強度は 220W である。往復の光があるので 2 倍すると、共振器内部には 440W のレーザ光が実現していることになる。IR ビューアを用いて共振器を撮影した写真を下図に示す。確かに共振器内部に高強度のレーザが実現していることが分かる。この結果は入射パワーの10<sup>5</sup>倍以上のパワーが光共振器内に蓄積されたことを示している。



IR ビューアーで見た蓄積共振器内部のレーザ光

# 7. 総括

加速器設計に関してマルチバンチ加速に対して以下のような結果が得られている。 図 11 はパルス毎に X 線を検出しつつ衝突タイミング依存の測定を行った結果である。 Y 軸の Bunch Number は値が小さいほど前方のバンチを用いて生成した X 線であること を示している。図から見て取れるように バンチ毎に最適な衝突タイミングがシフ トしていることがわかる。これはマルチ バンチビーム加速の際のビームローディ ング補正が不十分であったためにバンチ 間隔にずれが生じ、引き起こされた現象 である。実機ではさらに長いトレインを 用いるため、この効果はさらに顕著にな り補正が必須であることを示した。

KEK 小型電子加速器において、レーザ パルス蓄積装置に蓄積したレーザパルス



と 100 バンチのマルチバンチ電子ビームとの衝突による X 線生成実験を行い、これらの 衝突技術の開発、蓄積を行っている。この実験では、ビームサイズ、パルス長がそれぞ れ 30um、10ps のレーザパルスと 60um、20ps の電子ビームとの衝突を行い、衝突タイミ ングを 1ps の精度で、また衝突位置を数 um の精度で合わせることで X 線の生成に成功 し、基本的な衝突技術は確立されている。衝突タイミングはビームとの同期信号の位相 を調整することで合わせている。また、衝突位置はレーザパルスの位置をムーバー架台 を動かすことで合わせる。衝突点でビームプロファイルで互いの位置をラフに合わせた 後、X 線信号が最大になるよう微調整する。

今後、今までの2枚ミラー共振器から4枚ミラー共振器に変えてX線生成実験を行い、 この共振器での衝突技術の蓄積を行い、さらに詳細に検討を行うことにより、さらなる 実機に対する指針を与える予定である。



衝突点にあるプロファイルモニタで レーザーと電子ビームの位置を合わせる。



レーザーシステムはムーバー架台の上 に乗っており、これを動かして位置調整

今後、パルスレーザによる 3D-4 ミラー共振器の実用化と周回発振型レーザ蓄積法の 実用化を強力に進める。また、光高周波電子源のシミュレーションにより大強度電子ビ ーム生成が 8 µ sec パルス運転で可能であることを示したので、超伝導加速空洞製作技 術が確立する前に、5MeV-10 µ C電子ビームによる高輝度軟X線生成実証実験を進める。 これにより、電子ビームとレーザパルス衝突に関する技術を本番の実証実験前に確立す ることを目指す。同時に、高輝度軟X線の利用実証試験も行うことになる。

### 8. プロジェクトの総合的推進

外部有識者を含む先端加速器推進室報告会で本計画について報告した。研究開発運営 委員会を2回開催した。技術検討会等の開催は参画各機関を含めて8回行い、小型高輝 度光子ビーム源開発室(KEK-2号館4階406号室)を作った。プロジェクトで得られた 成果を発信するためのWebページを公開した。プロジェクトWebページ: http://kocbeam.kek.jp/index.html

#### 9. 参考文献

[1] 野口修一、加古永治 宍戸寿郎、渡辺 謙、仙入克也、「STF用ベースライン超伝 導空洞システムの開発」第2回日本加速器学会年会プロシーディング、鳥栖(2005) p194-196.

[2] 加古永治、宍戸寿郎、野口修一、早野仁司、渡辺 謙、「STFベースライン超伝導 空洞用大電力高周波入力結合器」第3回日本加速器学会年会プロシーディング、仙台 (2006) p136-138.

[3] 野口修一、梅森健成、加古永治、阪井寛志、宍戸寿郎、篠江憲治、早野仁司、山本 康史、渡辺 謙、文 成益、徐 慶金、「STFベースライン超伝導空洞システムの開発」 第3回日本加速器学会年会プロシーディング、仙台(2006) p133-135.

[4] 宍戸寿郎、加古永治、野口修一、早野仁司、渡辺謙、「STFベースライン超伝導空 洞における加速モードの周波数調整」第3回日本加速器学会年会プロシーディング、仙 台(2006) p865-867.

[5] 渡辺 謙、加古永治、宍戸寿郎、野口修一、早野仁司、「ILCベースラインのための超伝導空洞の高調波モードに関する研究」第3回日本加速器学会年会プロシーディング、仙台(2006) p877-879.

[6] 宍戸寿郎、梅森健成、加古永治、野口修一、早野仁司、山本康史、阪井寛志、篠江 憲治、渡辺 謙、「STFベースライン超伝導空洞における加速モードの周波数調整と性 能測定」第4回日本加速器学会年会プロシーディング、和光(2007) p452-454.

[7] 渡辺 謙、加古永治、宍戸寿郎、野口修一、早野仁司、「ILC超伝導空洞のための 高調波モードに関する研究」第4回日本加速器学会年会プロシーディング、和光(2007) p457-459.

[8] 加古永治、野口修一、早野仁司、宍戸寿郎、佐藤昌史、渡辺 謙、山本康史、「STF におけるTESLA-1ike空洞のクライオモジュール試験」第5回日本加速器学会年会プロシ ーディング、東広島(2008) p209-211.

[9] 山本康史、加古永治、佐藤昌史、宍戸寿郎、野口修一、早野仁司、渡辺 謙、「STF ベースライン空洞におけるローレンツデチューニングの観測とモデル計算との比較」第 5回日本加速器学会年会プロシーディング、東広島(2008) p215-218. [10] 山本康史、加古永治、佐藤昌史、宍戸寿郎、野口修一、早野仁司、渡辺 謙、「K EK-STFにおける超伝導空洞性能試験(縦測定)設備の構築」第5回日本加速器学会 年会プロシーディング、東広島(2008) p888-891.

[11] 加古永治、「超伝導空洞の高周波設計」高エネルギー加速器セミナー 0H0 '06 テキスト、(2006) 7章 p1-29.

[12] 加古永治、佐藤昌史、宍戸寿郎、野口修一、羽鳥浩文、早野仁司、山本康史、渡 辺 謙、「STFにおけるTESLA-like空洞のクライオモジュール試験」加速器学会誌「加 速器」Vol. 5, No. 2, (2008) p117-126.

[13] 渡辺 謙、「超伝導9セル加速空洞の高次モードに関する研究」博士課程学位論文、 (2008) 総合研究大学院大学 高エネルギー加速器科学研究科

[14] K. Watanabe, H. Hayano, S. Noguchi, E. Kako, T. Shishido, "Higher Order Mode Study of Superconducting Cavity for ILC Baseline", Proc. of EPAC2006, Edinburgh, Scotland (2006) p747-749.

[15] E. Kako, H. Hayano, S. Noguchi, T. Shishido, K. Watanabe, Y. Yamamoto, "Construction of the Baseline SC Cavity System for STF at KEK", Proc. of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA (2007) p2107-2109.

[16] K. Sennyu, H. Hara, M. Matsuoka, "Design and Fabrication of Superconducting Cavities for STF", Proc. of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA (2007) p2674-2676.

[17] E. Kako, H. Hayano, S. Noguchi, N. Ohuchi, M. Sato, T. Shishido, K. Watanabe, Y. Yamamoto, "Cryomodule Tests of the STF Baseline 9-cell Cavities at KEK", Proc. of EPAC2008, Genoa, Italy (2008) p868-870.

[18] Y. Yamamoto, H. Hayano, E. Kako, S. Noguchi, M. Sato, T. Shishido, K. Umemori, K. Watanabe, H. Sakai, K. Shinoe, S.I. Moon, Q.J. Xu, "Cavity Diagnostic System for the Vertical Test of the STF Baseline 9-cell Cavity at KEK", Proc. of EPAC2008, Genoa, Italy (2008) p643-645.

[19] K. Sennyu, H. Hara, M. Matsuoka, T. Yanagisawa, "Status of the Superconducting Cavity Development for ILC at MHI", Proc. of EPAC2008, Genoa, Italy (2008) p463-465.

[20] S. Noguchi, E. Kako, K. Watanabe, K. Sennyu, "STF Baseline Cavities and RF Components", Proc. of SRF2005, Ithaca, New York, USA (2005) ThP30.

[21] S. Noguchi, "Review of New Tuner Designs", Proc. of SRF2007, Beijing, China (2007) WE303.

[22] E. Kako, H. Hayano, S. Noguchi, T. Shishido, K. Watanabe, Y. Yamamoto, "High Power Input Couplers for the STF Baseline Cavity System at KEK", Proc. of SRF2007, Beijing, China (2007) TUP60. [23] E. Kako, H. Hayano, S. Noguchi, T. Shishido, K. Umemori, Y. Yamamoto, K. Watanabe,
H. Sakai, K. Shinoe, S.I. Moon, Q.J. Xu, "Vertical Test Results on the STF Baseline 9-cell
Cavities at KEK", Proc. of SRF2007, Beijing, China (2007) WEP10.

[24] Y. Yamamoto, H. Hayano, E. Kako, S. Noguchi, T. Shishido, K. Umemori, H. Sakai, K. Shinoe, S.I. Moon, K. Watanabe, Q.J. Xu, "Cavity Diagnostic System for the Vertical Test of the Baseline SC Cavity in KEK-STF", Proc. of SRF2007, Beijing, China (2007) WEP13.

[25] K. Watanabe, S. Noguchi, E. Kako, T. Shishido, H. Hayano, "New HOM Coupler Design for ILC Superconducting Cavity", Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Research A 595 (2008) p299-311.

発表した成果(発表題目、 ロ頭・ポスター発表の別)	発表者 氏名	発表した場所(学会 等名)	発表した時期	国内・外の 別
招待公演 Laser Super-cavity (口頭)	浦川順 治	Alghero (Porto Conte), Italy (Workshop on Compton for X/g Rays	2008 年 9 月 10 日	国外
招待公演 CR/ERL e+ source for ILC, CLIC (ロ 頭)	大森恒 彦	Alghero (Porto Conte), Italy (Workshop on Compton for X/g Rays	2008 年 9 月 11 日	国外
KEK-ATF における ILC 偏極 陽電子源の為のレーザー 蓄積空洞を用いた高輝度 ガンマ線生成実験の現在 までの結果と進展(ロ頭)	牛尾恭 彰その 他	山形大学(日本物理 学)	2008 年 9 月 23 日	国内
Inverse Compton Scattering Based Polarized Gamma-rays Generation Experiment for ILC Positron Source - Polarized positron generation and capture simulation (口頭)	李小平 その他	山形大学(日本物理 学)	2008 年 9 月 23 日	国内

## 10. 成果の外部への発表

学会等における口頭	•	ポス	タ	一発表
-----------	---	----	---	-----

		IUAC and Delhi		
Coupler fabrication for KEK-STF (口頭)	加古永	University, TTC		
	治	Meeting in New	2008年10月21日	国外
		Delhi, India		
		IUAC and Delhi		
STF cryomodule tset (ロ	加古永 治	University, TTC	2008 年 10 月 22 日	
頭)		Meeting in New		国外
		Delhi, India		
		IUAC and Delhi		
Cavity and package	野口修	University, TTC		
production for KEK-SIF	_	Meeting in New	2008年10月21日	国外
(口頭)		Delhi, India		
		IUAC and Delhi		
Surface study by using	佐伯学	University, TTC		国外
sample plate (口頭)	行	Meeting in New	2008年10月22日	
		Delhi, India		
		IUAC and Delhi		
KEK-STF cryomodule	大内徳 人	University, TTC	2008 年 10 月 21 日	
assembly report(口頭)		Meeting in New		<b>国外</b>
		Delhi, India		
		IUAC and Delhi		
STF cryomodule test plan	大内徳 人	University, TTC	0000 左 10 日 00 日	国外
(口頭)		Meeting in New	2008年10月22日	
		Delhi, India		
		IUAC and Delhi		国外
STF T-mao results (口頭)	山本康 史	University, TTC	2000 左 10 日 21 口	
		Meeting in New	2008年10月21日	
		Delhi, India		
Pagant inspection		IUAC and Delhi		
results by Kyoto-camera (口頭)	渡邉謙	University, TTC	2009 年 10 日 21 日	모
		Meeting in New	2006 平 10 月 21 日	国71
		Delhi, India		
		IUAC and Delhi		
STF new-EP	上野健	University, TTC	2008 年 10 日 22 日	国政
commissioning(口頭)	治	Meeting in New	2000 - 10 月 22 日	
		Delhi, India		

Gamma ray generation by laser-Compton scattering at the KEK-ATF (口頭)	三好修 平その 他	つくば市 (TIPP09 国 際会議)	2009年3月1日	国外
KEK-ATF における ILC 偏極 陽電子源の為のレーザー 共振器を用いた高輝度ガ ンマ線生成実験 I (ロ 頭)	三好修 平その 他	立教大学(日本物理 学会第 64 回年次大 会)	2009 年 3 月	国内
KEK-ATF における ILC 偏極 陽電子源の為のレーザー 共振器を用いた高輝度ガ ンマ線生成実験 II (ロ 頭)	赤木智 哉その 他	立教大学(日本物理 学会第 64 回年次大 会)	2009 年 3 月	国内
L バンドフォトカソード RF 電子銃の開発(ポスタ ー)	柏木茂 その他	第五回日本加速器 学会年会	2008 年 8 月	国内
L バンド高周波電子源開 発 (ロ頭)	柏木茂 その他	立教大学(日本物理 学会第 64 回年次大 会)	2009 年 3 月	国内

#### 学会誌・雑誌等における論文掲載

[1]. "Photon Generation by Laser-Compton Scattering Using an Optical Resonant Cavity at the KEK-ATF Electron Ring" Radiation Physics and Chemistry, Vol. 77, Issue 10-12, pp.1136-1141, October-December 2008, Journal of the Physical Society of Japan Vol.78No.7, Hirotaka Shimizu, Sakae Araki, Yoshisato Funahashi, Yosuke Honda, Toshiyuki Okugi, Tsunehiko Omori, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Masao Kuriki, Shuhei Miyoshi, Tohru Takahashi, Yasuaki Ushio, Tachishige Hirose, Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Pei Guoxi, Li XiaoPing

[2]. "Stabilization of a non-planar optical cavity using its polarization property" Optics Comminications (掲載決定), Y. Honda, H. Shimizu, M. Fukuda, T. Omori, J. Urakawa, K. Sakaue, H. Sakai, N. Sasao

[3]. "100-femtosecond MeV electron source for ultrafast electron diffraction" Radiation Physics and Chemistry(掲載決定), Jinfeng Yang, Koichi Kan, Nobuyasu Naruse, Yoichi Yoshida, Katsumi Tanimura, Junji Urakawa

[4]."Recent Progress of a Soft X-ray Generation System based on Inverse Compton Scattering at Waseda University" Radiation Physics and Chemistry, Vol. 77, Issue 10-12, pp.1136-1141, October-December 2008, Kazuyuki Sakaue, Tomoko Gowa, Hitoshi Hayano, Yoshio Kamiya, Shigeru Kashiwagi, Ryunosuke Kuroda, Akihiko Masuda, Ryo Moriyama, Junji Urakawa, Kiminori Ushida, Xijie Wang and Masakazu Washio

[5]. "Design of a mode separated RF photo cathode gun" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 600 (2009) 361-366, Abhay Deshpande, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Kazuyuki Sakaue, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Noboru Sasao, Masakazu Washio

[6]. "Demonstration of a Multi-Pulse X-ray Generation via Laser-Compton Scattering Using Pulsed-Laser Super-Cavity" Proceedings of LINAC Conference 2008, TUP065, Victoria, September 2008, in press, Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Yasuo Higashi, Yosuke Honda, Takashi Taniguchi, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Noboru Sasao

掲載した論文(発表題目)	発表者氏 名	発表した場所(学 会誌・雑誌等名)	発表した 時期	国 内・外 の別
Photon Generation by Laser-Compton Scattering Using an Optical Resonant Cavity at the KEK-ATF Electron Ring	Hirotaka Shimizu, et al.	Journal of the Physical Society of Japan	2009 年 6 月掲載確 定	国外
Stabilization of a non-planar optical cavity using its polarization property	Y. Honda, et al.	Optics Comminications	掲載決定 2009 年 5 月オンラ イン版公 表済	国外
100-femtosecond MeV electron source for ultra fast electron diffraction	Jinfeng Yang, et al.	Radiation Physics and Chemistry	2008 年 6 月掲載確 定	国外
Recent Progress of a Soft X - ray Generation System Based on Inverse Compton Scattering at Waseda University	Kazuyuki Sakaue, et al.	Radiation Physics and Chemistry	2008 年 11 月掲載	国外

Design of a mode separated RF photo cathode gun	Abhay Deshpande, et al.	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A	2009 年 1 月掲載	国外
Demonstration of a multi-pulse x-ray generation via laser-Compton scattering using pulsed-laser super-cavity	K. Sakaue, et al.	Proceedings of LINAC Conference 2008	2008 年 10 月掲載	国外