平成24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25年6月14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24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 24 年度の事業計画	1
3. 実施体制と役割分担	3
4. 委員会・会議・打合せ・研究会	4
5. 平成 24 年度研究成果報告 A. 新フォトカソード開発 東大:上坂研 新フォトカソード:可視光カソード試運転	7
B. 大強度高品質電子源の開発 広大:栗木研 大強度高品質電子源開発	14
 C. 高圧 DC Gun 開発と入射部超伝導空洞開発 日立ハイテクノロジーズ:小瀬グループ、原機構:羽島グループ C-1. 直流高電圧要素開発 C-2. 直流高圧電子源開発 C-3. 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 	20 28 40
D.レーザー蓄積装置の開発 広大:高橋研 パルスレーザー蓄積装置開発	44
E.パルス超伝導加速空洞技術の開発 KEK:早野グループ パルス超伝導加速空洞技術の開発	49
F. CW 超伝導加速空洞技術の開発 KEK:古屋グループ CW 超伝導加速空洞技術の開発・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	61
G.X線検出装置の実用化開発 KEK : 幅グループ X線検出装置開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	76
H.X線の検出装置(時間分解及び空間分解)の設計及び試作の実施 早稲田 : 鷲尾研 X線測定および利用研究	81
Ⅰ. 電子ビーム・レーザー衝突技術の開発(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・レーザー衝突技術の開発(システム統合化)と プロジェクトの総合的推進	. 87
	07

目 次

4. 委託業務の目的

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。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。

2009 年度から以上の目的に大強度安定化に必要な次の技術開発を加える。500 ~ 750 kV 数十 mA の高電 圧 DC 電子源開発、高性能光 L-band RF Gun 開発、小型高信頼性 L-band 高周波源開発および 3 次元 4 枚ミラ ーリング光蓄積装置開発を行う。これにより、生成する X 線輝度を 100 倍以上高くすると同時に、レーザー 光の偏光を高速で制御することによってのみ可能な世界でも特筆すべき高速可変偏光小型軟 X 線源を実現 し、「軟 X 線領域における円二色性光源」として実用化を図る。

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 24 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。広島大学では極高真空によるカソード評価装置を構築し、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を行う。

C. 高圧 DC Gun 開発と入射部超伝導空洞開発

C-1. 直流高電圧要素開発(高電圧試験装置の設計と製作)

750 kV 印加可能な電子銃の実現に必要な要素技術として、耐電圧および暗電流特性に優れた電極、セラミックの研究開発に着手する。今年度は、高電圧試験装置の設計と製作を行う。

C-2. 直流高圧電子源のための高電圧発生装置の開発

前年度までの業務で製作した装置を用いて、光陰極表面の洗浄・活性化試験、引き続いて電子ビーム発生 試験を進める。光陰極の長寿命化に必要な真空排気系の増強を行う。

C-3. 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 超伝導加速空洞の開発を進め、前年までに試作した空洞の性能試験を行い、CW 型超伝導加速空洞モジュールの製作に必要な知見を得る。

D. レーザー蓄積装置の開発

2011 年に引き続き、KEK における光子ビーム生成のためのレーザー蓄積装置の設計を継続する。また、 同装置のための、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研究を推進する。

E. パルス超伝導加速空洞技術の開発

製作コスト削減に向けた2台の空洞を使った電子ビーム加速試験を行う。この空洞の系統的な研究を大強 度電子ビーム加速によって平成24年度末まで継続する。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、平成24年度は2台の9cell空洞の性能を大強度電子ビーム加速と高輝度X線発生実験で調 べ、超伝導加速システムの空洞装置の最適化設計を完成させる。本加速空洞で大電流ビームを加速すること によって、ビーム負荷の影響が設計値通りであるかを確認する。このビーム負荷のデータを使い、より信頼 性の高いパルス超伝導空洞設計に反映させる。また、製作コスト削減方法の検討資料も作成する。

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。系統的な開発研究を通じて 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、平成 24 年度は超伝導空洞モジュールの試作機を使用して具体的な検討報告を行う。300 kW の CW 高周波源を使って、空洞の加速勾配や位相制御の安定性を測定する。また、熱負荷が設計値通りに成っているか確認する。

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解像度が検出器のピクセル値 (20 um 程度)まで達成できるか測定する。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。例えば、単パルス電子ビームのみで十分な X 線イメージング写真が得られ るかどうか? 何ショットのビームが必要になるかを見極める。また、検出器の時間分解能がどの程度あり、 動的変化をどの程度の速さで測定できるか調べる。平成 24 年度は、X 線検出装置の性能を調べて、高輝度 X 線発生装置の検出器として実用に供する。例えば、高分解能位相コントラスト X 線イメージング測定等に 使う。

H.X線の検出装置(時間分解及び空間分解)の設計及び試作の実施

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。一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

I. 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

平成 23 年度までに高周波電子源を使って得られた 300 nC/300 nsec 電子ビーム生成実績を向上するために、 新しい電子源を製作した。また、5 MeV および 10 MeV 大強度電子ビームとレーザーパルスを高繰り返しで 衝突させて、レーザー逆コンプトン散乱で軟 X 線から硬 X 線生成実験を行った。平成 24 年度は真空対応の 2 次元 4 枚ミラーリング光蓄積装置を製作して、生成 X 線を使った位相コントラスト X 線イメージングや屈 折コントラスト X 線イメージング等の測定を行い実用試験を推進する。また、引き続き電子ビーム・レーザ 一衝突実験によって、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。

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、国内外において積極的に公表し、併せて超伝導加速空洞やその 周辺機器の最先端知見を得ることで、今後の展開に資する。

高安定高電圧電源開発を株式会社日立ハイテクノロジーズが担当するので、独立行政法人日本原子力研究 開発機構と日立ハイテクノロジーズ間の研究開発調整を大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 が行い、平成24年度までに500kV数十mA以上の電子ビーム生成実証試験を遂行できるように研究開発を 纏める。また、広島大学と研究協力機関大阪大学産業総合研究所が「高性能光L-band RF Gun 開発」を行う。 これについてもL-band RF Gun 性能実験設備を所有する大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 が研究開発の調整と纏めを行う。

実施体制と役割分担

業務主任者 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 超伝導リニアック試験棟(STF)	加速器研究施設 教授 早野 仁司
① -B CW 超伝導加速空洞技術 の開発	同 ERL 開発棟	加速器研究施設 教授 古屋 貴章
②電子ビーム・レーザー衝突 技術の開発 (システム統合化)	同 先端加速器試験棟 (ATF)	加速器研究施設 准教授 照沼 信浩
③ X 線検出装置の実用化開発	同 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	同 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 用入力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	_
新フォト	・カソー	ド開発	2	茨城県那珂郡東海村白方白根 工学系研究科原子力専攻	
				2-22、東京大学大学院 教授 上坂 充	

国立大学法人広島大学では、レーザー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レーザー蓄積装置の開発	東広島市鏡山1-3-1	大学院先端物質科学研究科 准教授
	広島大学大学院	高橋 徹
② 大強度高品質電子源の開発		大学院先端物質科学研究科 教授
		栗木雅夫
		飯島 北斗(平成21年7月1日から)

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直流高圧電子源の開発	茨城県那珂郡東海村白方白根	羽島	良一
	2-4	永井	良治
②直流高圧電子源と組み合わ	日本原子力研究開発機構	西森	信行
せて使用する CW 超伝導加速		飯島	北斗 (平成 21 年 6 月 30 日まで)
空洞の研究開発		沢村	勝

株式会社日立ハイテクノロジーズでは、高電圧 DC 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	
高電圧 D	C 電子	源開発		茨城県ひたちなか市市毛 882 主管技師 小瀬 洋一	
				番地	
				株式会社日立ハイテクノロジ	
				ーズ 研究開発本部	

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

溝	É	務	項	目	実	施	場	所			担	当	責	任	者	
X 線	食出 ねんしょう しょうしょう しょうしょう しょうしょう しょうしょう しんしょう しんしょ しんしょ	器の開	発		東京都新	宿区	大久	保3	丁目4	理工	学術院	教授	STZ .			
					番1号					鷲尾	方一					
					学校法人	早稲	田大	、学								

4. 委員会・会議・打合せ・研究会

研究会

2013.03.18-19 Mini-workshop for advanced THz and Compton X-ray generation schmeusing compact electron accelerator KEK 職員会館 2 階会議室

STF 量子ビーム打合せ

2012.04.04	KEK 1 号館談話室
2012.04.18	KEK 1 号館談話室
2012.05.02	KEK 1 号館談話室
2012.05.16	KEK 1 号館談話室

2012.05.30	KEK 1 号館談話室
2012.06.13	KEK 1 号館談話室
2012.06.27	KEK 1 号館談話室
2012.07.11	KEK 1 号館談話室
2012.07.25	KEK 1 号館談話室
2012.08.22	KEK 1 号館談話室
2012.09.05	KEK 1 号館談話室
2012.09.19	KEK 1 号館談話室
2012.10.03	KEK 1 号館談話室
2012.10.17	KEK 1 号館談話室
2012.10.31	KEK 1 号館談話室
2012.11.14	KEK 1 号館談話室
2012.11.28	KEK 1 号館談話室
2012.12.12	KEK 1 号館談話室
2012.12.26	KEK 1 号館談話室
2013.01.16	KEK 1 号館談話室
2013.01.30	KEK 1 号館談話室
2013.02.13	KEK 1 号館談話室
2013.02.27	KEK 1 号館談話室
2013.03.13	KEK 1 号館談話室
2013.03.25	KEK 1 号館談話室
2013.04.03	KEK 1 号館談話室

定例レーザー蓄積技術打ち合わせ

2012.06.12 量子ビーム・レーザー打ち合わせ KEK1号館談話室2
2012.07.24 量子ビーム・レーザー打ち合わせ KEK1号館談話室2
2012.09.24 量子ビーム・レーザー打ち合わせ 早稲田大学55号館4F
2013.01.16 デジタルフィードバックに関する打ち合わせ KEK1号館談話室2
2013.03.06 量子ビーム・レーザー打ち合わせ KEK1号館談話室2

定例 LUCX Meeting

2012.04.05	小型X線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.04.12	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.05.10	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.05.17	小型X線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.05.31	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.06.07	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.06.14	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.06.28	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.07.05	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.07.12	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.07.19	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.07.26	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ

2012.08.02	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.08.23	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.08.30	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.09.27	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.10.04	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.10.11	小型X線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.10.18	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.11.08	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.11.15	小型X線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.11.22	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.12.06	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2012.12.20	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2013.01.17	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2013.01.31	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2013.02.07	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2013.03.07	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2013.03.21	小型 X 線源実験打ち合わせ	(LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ

定例 L-band RF 電子銃開発グループ会合

2012.04.19	第40回 L-band RF 電子銃開発グループ会合(インターネット接続)
2012.05.17	第41回 L-band RF 電子銃開発グループ会合(インターネット接続)
2012.06.14	第42回 L-band RF 電子銃開発グループ会合(インターネット接続)
2012.07.19	第43回 L-band RF 電子銃開発グループ会合(インターネット接続)
2012.08.23	第44回 L-band RF 電子銃開発グループ会合(インターネット接続)
2012.09.25	第45回 L-band RF 電子銃開発グループ会合(インターネット接続)
2012.10.30	第46回 L-band RF 電子銃開発グループ会合(インターネット接続)
2012.11.27	第 47 回 L-band RF 電子銃開発グループ会合(インターネット接続)
2013.01.15	第48回 L-band RF 電子銃開発グループ会合(インターネット接続)
2013.02.15	第49回 L-band RF 電子銃開発グループ会合(インターネット接続)
2013.03.18	第50回 L-band RF 電子銃開発グループ会合(インターネット接続)

その他打合せ

2012.05.10 第2回共同レーザー開発打ち合わせ KEK-LC コンテナ

5. 平成 24 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 New Photocathode Development

概要

東京大学東京大学大学院工学系研究科原子力専攻ライナック研究施設 18 MeV 電子線形加速器用フェムト 秒パルスレーザー使用の高周波電子銃用カートリッジ式フォトカソード高周波電子銃を用いて可視光駆動フ ェムト秒パルスレーザーの高輝度電子源開発において Na₂KSb、Cs₂Te カソードのビーム試験とマルチアルカ リ光電面の研究開発を行っているが、266 nm と 400 nm の励起波長に対して光電面環境の影響分析または光 電面ナノ薄膜の物性評価を充実させる必要がある。平成 24 年度は、超高真空対応を目指し分子線エピタキ シー用チャンバーの作製と改良を行い、到達真空度の向上を行った。チャンバーの組み付けに関して分子線 発生のためには真空状態向上と分子線位置の最適化と分子線エピタキシー測定、分析機器及び環境対応機構 の充実を行う。その上で、高電界用 Na₂KSb(可視光駆動用)・Cs₂Te(大電流用)カソードのための製膜技 術の科学技術的課題を明確化する。また、2 種類のカソードの、カートリッジ型での高周波電子銃での高電 界電子発生試験と劣化機構と解決策を総括する。以上により、高品質電子ビーム源用の Na₂KSb(可視光駆 動用)・Cs₂Te(大電流用)カソードの高品質 X 線発生応用への科学技術指針を明確にする。

また昨年度まで東大研究として行っていた超伝導カプラーの開発は今年度からは高エネルギー加速器研究 開発機構に含まれることになった。

さらに、本事業を次期に円滑に発展させるため、現東大・日本原子力研究開発機構(以後 JAEA)に加えて、 高エネルギー加速器研究開発機構(以後 KEK)と広島大学との研究開発の協力連携体制を構築することと した。

JAEA 成膜装置での成果

今年度、実験用消耗品を購入し MBE 成膜装置の整備と調整を行った。エクストラクターゲージ IE514 用 交換カソードを購入し超高真空対応機器カソードのメンテナンスを行った。アルカリメタルディスペンサー 用消耗品を購入しアルカリメタルディスペンサーの整備及び成膜用蒸着源とした。成膜用基板金属を購入し 光電面用基板として使用した。計測システム用の消耗品を購入し加速器用サーバーのメンテナンス及びバッ クアップを行った。また、走査型電子顕微鏡観察のために電子ビームによるチャージアップ防止及び表面形 状を電子線より保護するため蒸着源として高純度 Au を使用した。MBE チャンバー専用高純度 PBN 坩堝を 購入し k- セル内部において成膜用金属保持に使用した。

日本原子力研究開発機構 ERL グループ所有 MBE 装置の立ち上げ及び調整を継続して行なっており、図1 に示すように真空度の高度化、リークチェック、ベーキング処理、MBE 成膜装置調整、測定系調整、ヒー ターアッセンブリ、k-セル等の装置調整を行なっている。マルチアルカリフォトカソード光電面ナノ薄膜の 分析と物性評価のため、アルカリメタルディスペンサー及び励起電子引き出し用電流端子の整備と調整を行 った。

この成膜装置でのマルチアルカリフォトカソード光電面の製作には至らなかった。しかし今年度にKEK と広島大学との研究開発協力連携体制を構築できた。並行して研究開発を実施した両者での成膜と電子発生 と量子効率の評価は達成した。以後にそれらの成果を説明する。



(a) MBE 装置外観
 中央銀色部分が MBE 装置本体、左側がサブリメーションポンプ、下側がイオンポンプ、左奥のラックが計測
 及び制御用機器



(c) k- セル昇温時の様子 右下赤熱部分が基板蒸着用分子線発生源、中央矩形部 分が基板ヒーターアッセンブリ、左上が膜厚測定導入 機構



(b) アルカリメタルディスペンサー導入機構及び引き出 し電極導入機構

右側中央2本の碍子より突き出た部分が電流導入機構、 左側一本の碍子を挟んで引き出し電流端子制御用機器



(d) MBE 成膜装置内部

中央黒い円柱が基板金属、中央上よりの2本の電極が アルカリメタルディスペンサー、中央基板を囲む円形 電極が励起電子引き出し電極

図1:BE チャンバー外観と主要部分、MBE チャンバー外観、アルカリメタルディスペンサー導入端子、引き出し電極導入機構、k-セル昇温時のチャンバー内部の様子、MBE 成膜装置内部主要機構

2. KEK レーザーアブレーション成膜装置での成果

2.1 Na₂KSb フォトカソード

電子線形加速器カートリッジ式フォトカソード高周波電子銃に使用するレーザー駆動高輝度高周波電子源 に関する研究開発のため、KEK ではマルチアルカリカソード Na₂KSb 成膜用兼評価用チャンバーを製作した。 ここではレーザーアブレーション成膜技術を採用している。また、今後 Yb を利得媒質とした高出力レーザ ーの2次高調波(波長 532 nm)がフォトカソード用レーザーに使用される可能性があるため、波長 532 nm 程度の可視光でも高量子効率が期待できる K₂CsSb の開発も行った。

図2(a) にフォトカソード成膜兼評価用チャンバー外観を示す。チャンバー内には成膜用にカソード基盤 (図1(b))、カソード加熱用ヒーター、Na、K(もしくはCs、K)分子線発生用ディスペンサーとSb分子線 発生用るつぼ(図2(c))が設置された。量子効率評価用にはアノードと、レーザー光照射窓としてCaF₂窓 が取り付けられた。チャンバー内配置は図2(d)のようになっている。Na₂KSb成膜試験では、ヒーターで

カソードを加熱しながら Na、K ディスペンサーおよび Sb 粒の入ったるつぼを取り巻くタングステンワイヤ ーに電流を流し加熱させて、分子線を発生させる。カソード表面に蒸着される分子量は流す電流量を変化さ せることで制御可能となる。生成された光電面に対し波長 405 nm のレーザー光を照射し、カソードへ流れ る電流量から量子効率を求めた。成膜試験では量子効率が高くなるようディスペンサーとタングステンワイ ヤーに流す電流量を調整した。Cs,KSb 成膜試験においては L. Cultrera et al.[1]に準じた手順で成膜を行った。 初めにヒーターでカソードを加熱しながら Csを蒸着させ、Csを堆積させる。次に K、Csを順に蒸着させ る。その際蒸着中に白色光を照射し、光電流が上昇して飽和するまで蒸着を続けた。量子効率測定には波長 535 nm のレーザー光を用いた。



(a) チャンバー外観 ベーキング時の様子。中央チャンバーに対して左手前 に真空ポンプ、右手前に真空計、右にレーザー光用



(b) カソード部分 銅のカソード基盤を使用した。



(c) 分子線発生機構 サーが取り付けられている。



(d) チャンバー内の様子

下にWの巻かれたるつぼ、左右にNa、Kのディスペン 右上からカソード支持用の腕が出ている。左のるつぼ およびディスペンサーから分子線を発生させ、下の穴 からレーザーを照射する。

> 図2:マルチアルカリカソード成膜用チャンバーの様子 (a) チャンバー外観、(b) カソード部分、 (c) 分子線発生機構、(d) チャンバー内部

^[1] L. Cultrera et al., Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference, NY, USA, WEP244 (2011)

カソード成膜時の真空度は 10⁸Pa 台に到達した。Na、K、Sb の蒸着量を調整し、波長 405 nm のレーザー 光照射から得られた電流値を図 3 に示す。図 3 から量子効率は 0.136% と求まった。今回達成できた量子効 率は 1% 未満であったが、今後成分調整、および成膜方法の改良によって 1% 以上の量子効率を実現できる と考えている。また、今回の量子効率であってもレーザー光の出力を高めることで mA オーダーの高電流量 が容易に得られることが分かる。



図3: Na₂KSb カソード量子効率測定結果

2.2 K₂CsSb フォトカソード

カソード成膜時の真空度は Na₂KSb カソード成膜時に比べ低下し、10⁻⁷Pa 台にとどまった。しかし、 K₂CsSb フォトカソード成膜後、波長 535 nm レーザーで照射したところ光電流が生じたことが確認できた。 Cs は Na より容易に酸化されるため、到達真空度を向上させることで今後量子効率を高められると考えられ る。また、各元素の蒸着量、カソード温度の測定装置を組み込むことで成膜精度を高め、量子効率の向上に つながると見込める。

3. 広島大学成膜装置での成果

広島大学では、東京大学、KEKと協力してのマルチアルカリカソード開発研究の一環として、K₂CsSb 蒸 着試験を性能評価を目的に研究をすすめてきた。K₂CsSb は他のマルチアルカリカソードと同様に緑色レーザ ーによる電子発生が可能であり、金属カソードよりも数桁以上量子効率が高く、かつ耐久性にも優れている という可能性が指摘される物質である。一方で加速器用の電子発生材料としての実績に乏しく、実用化のた めには薄膜生成技術の確立とともに、加速器用の電子源としての性能を確認し、技術的妥当性を確認する必 要がある。そこで、広島大学では、独自に薄膜生成および電子引出試験が行えるマルチアルカリ試験装置を 製作し、K₂CsSb 生成試験およびビーム引出試験の準備を進めてきた。図4 (a) は製作した薄膜カソードを生 成する基板マウント部の写真であり、左端が SUS 製の基板である。基板の材質も研究の対象であるから、基 板は交換可能である。また薄膜生成時の温度管理をするため、ヒーターおよび熱電対を装着している。図4 (b) がその概念図で赤い部分がヒーターである。基板は電気的に筐体から絶縁されており、バイアスをかけるこ とで、電子引出が可能な構成である。図4 (c) は蒸着源の概念図であり、Cs および K は線状ディスペンサー から、Sb は金属粒をタングステンカゴ状ヒーターで加熱し、蒸気を発生させる。ディスペンサーは蒸気が 狭い立体角に発生するよう作られているため、左右対称に蒸気を発生させるように図4 (d) のような構成を とっている。基板と対称な位置に膜厚計を設置し、基板への蒸着と同時に膜厚を計測できるような構成とな っている。

図5は蒸着試験の結果の一例であり、横軸に時間をとり、左側縦軸に量子効率、右側縦軸に蒸着膜厚をと り示したものである。量子効率は白色LEDで取得した値であるので、参考値として考えていただきた。K の蒸着途中から有限の量子効率が観測されはじめ、Csの蒸着とともに急激にその値を上昇させる。最大で およそ3.8%の量子効率が得られている。図6はビーム引出を続け、そのさいの量子効率の引出電荷量によ る変化を観測したもので、量子効率の劣化がほとんど見られず、少なくとも引出電荷量寿命は数千 C 程度は あるものとみられる。

今後は光源系の整備をすすめ、蒸着条件による量子効率や電荷量寿命などの性能の依存性、波長依存性、 成膜方法等についての定量的研究開発を進めていく。マルチアルカリカソードは緑色励起や長寿命などの特 長の一方で、元素量や種類の違いにより多用な化合物となることがしられている。Na₂KSb や K₂CsSb はその 一例であり、KEK 等と協力のもとで研究をすすめ、将来は標準技術となるような高性能カソードの開発を 進めていく。



(a) 製作されて蒸着基板マウント部の写真 左端が SUS 基板。背後に熱電対を装着し、蒸着時の温 度を測定している。



(b) 基板マウント部の概念図 前面が SUS 製基板。赤で示されているセラミックヒー ターにより加熱し、温度を制御する。



(c) 蒸着源の概念図

Csと**K**はディスペンサータイプの蒸着源を用いている。 **Sb**は粒をかご状タングステンヒーターに入れ、加熱し て蒸気を発生させる。



(b) ディスペンサーによる蒸着源 左右対称に蒸気が発生するように配置し、基板に蒸着 すると同時に対称な位置に置かれている膜厚計で蒸着 量を測定できる。

図4:蒸着基板マウント部とディスペンサーによる蒸着源





図5:横軸に時間をとり、各金属の蒸着量(右側 縦軸)および量子効率(左側縦軸)をしめした もの。最大で3.8%の量子効率が得られた。

図 6: 横軸に引き出された電荷量、縦軸に量子効 率をしめしたもの。ほとんど減衰は見られない。

4. 平成 24 年度の成果のまとめ

JAEA と協力のもと、MBE 成膜装置を完成させた。マルチアルカリカソードの製作、電子発生、量子効率の評価は今後の課題となった。

一方、KEK でのレーザー成膜装置では、当初の目標であった Na₂KSb のカソードの製作、電子発生、量子 効率を達成することができた。成膜法の最適化と量子効率の向上が今後の課題である。

また広島大学の協力を得て、Na₂KSb カソードと同等に実用化が期待されている K₂CsSb カソードの開発に も着手した。量子効率につき、まだ初期段階であるが、KEK と共同の Na₂KSb カソードの 0.136% を上回る 3.8% を計測した。今後このカソードへの期待が高まると考えられる。

5. 平成 20-24 年度の成果のまとめ

平成 20、21 年度には、(株)浜松ホトニクス製のカートリッジ型 Na₂KSb カソードの試験と品質の時間的 変化、および放射線化学パルスラジオリスへの利用を行った。Na₂KSb カソードは現在も、数年に1度の交 換で十分使用に耐え得ることを実証した。その劣化については、新規設置時の高周波電力エージング・運転 時の放電による表面粗さと組成の変化が主要因であることを明らかにした。

平成 22、23、24 年度は、大学・研究機関でのマルチアルカリカソードの自主開発を行った。特に平成 24 年度からは、本事業での特徴のプラットフォームを活用して、KEK でのレーザー成膜装置で Na₂KSb のカソードの、広島大学の協力を得て、Na₂KSb カソードと同等に実用化が期待されている K₂CsSb カソードの開発 にも着手し、成膜、電子発生、量子効率を達成することができた。量子効率につき、まだ初期段階であるが、KEK と共同の Na₂KSb カソードの 0.136% を上回る 3.8% を計測した。今後このカソードへの期待が高まると 考えられる。

成膜法の最適化と量子効率の向上が今後の課題である。

開発スタッフ

責任者:上坂充(東京大学大学院工学系研究科原子力専攻)

担当者:上田徹、中園祥央(東京大学大学院工学系研究科原子力専攻) 松村陽介(東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻)

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

概要

広島大学は本プログラムにおいて、大強度高品質電子源およびレーザー蓄積装置の開発を課題として、取り組んできた。レーザーコンプトンによるX線源開発において、電子源とレーザー蓄積装置はX線生成効率に直結する重要コンポーネントである。プログラムの最終年度にあたり、今までの研究成果とともに、この五年間にわたる研究を総括し、報告に代えたい。

1. 大強度高品質電子源の開発

レーザーコンプトン散乱における X 線生成数は、生成断面積とルミノシティとの積で決まる。ルミノシティとは単位時間あたりに通過する粒子の密度に比例する量で、大量の粒子を高い繰り返しで供給し、さらに 密度を高めるためになるべく小さいスポットに絞り込むことが必要となる。電子源に対する要求に焼き直す と、なるべく大きな電荷量のビームを、高い繰り返しで生成し、かつエミッタンスを小さくすべし、となる。 ビームを収束光学系で絞り込んだ時の限界のスポット径はエミッタンスのルートで決まるので、高密度ビー ム生成のためにはエミッタンスをなるべく小さくする必要があるからだ。以上のような条件のもと、大強度 電子源は次の二つの戦略的なアプローチをとった。

- 1) DC 電子銃による連続ビーム生成。100% という高い稼働率により高いルミノシティを実現可能であ るが、高電圧電子銃、充分なカソード運転寿命を実証しなければならず、実用化の上での課題が多い。 次の段階における実用化をみこみ、これらの要素技術開発を行った。
- 2) RF 電子銃による長パルス電子ビーム生成。稼働率は 0.5% と低いが、従来技術に比べて数十倍のルミ ノシティ向上がみこめ、かつ既存技術により実現できるため、X 線生成の実証機に採用することにし た。
- 以下、この二つの課題について報告する。

1.1 DC フォトカソード電子銃開発

本方式では、レーザーフォトカソードで 1.3 GHz 繰り返しで連続したパルストレインを発生させ、そのビ ームを DC 型の電子銃で加速する。1.3 GHz は主加速器の RF 周波数であり、本加速器で実現できる最大繰 り返しに相当する。カソード部には Negative Electron Affinity (NEA) -GaAs フォトカソードを使用し、赤外 光励起により、余分な熱的エネルギーをほとんど持たない超低エミッタンスビームを生成する。本方式は連 続ビーム発生により 100% という圧倒的に高い稼働率を実現し、かつ NEA-GaAs が生成するエミッタンスは 等価エネルギーにして 30 meV とほぼ室温に相当する低い値であることから、原理的に極めて高いルミノシ ティを実現できる。一方、非線形空間電荷効果によるエミッタンス増大を抑制するため、500 kV ~ 700 kV という DC 加速による高勾配の実現、NEA-GaAs カソードの長時間運転の実現など、技術的ハードルが高い。 DC 高電圧電子銃開発は JAEA が担当し、NEA-GaAs カソードの長寿命化を広島大学が担当して研究開発を すすめてきた。

NEA-GaAs は p 型 GaAs 清浄表面に Cs-O を蒸着することでカソードとして機能するようになる。この操作を NEA 活性化と呼ぶ。GaAs はそもそも仕事関数 3.7 eV 程度を有しているが、Cs-O を蒸着させることで表面準位構造が変化し、真空準位が伝導帯準位よりも下にくる NEA 状態となることが知られている。NEA 表面からはバンドギャップに相当する 1.4 eV 程度のエネルギーの光で光電効果が生じ、量子効率が 10% 以上と高く、余分なエネルギーをほとんど持たない低エミッタンスビームが生成可能であることが知られている。他方、このような NEA 表面は脆弱であり、実用上の課題であった。広島大学では NEA-GaAs の長寿命 化を目指して研究をすすめ、NEA は次の三つのプロセスにより破壊されることを突き止めた。一つ目はガ

ス吸着で、水や二酸化炭素など残留ガスとして含まれる特定のガス種が NEA 表面に吸着することで NEA 活 性が失われる。このプロセスによる量子効率の減少は時間とともに進行し、ガス分圧に比例する速度で進行 する。本研究の成果から、特定のガス種について le-10Pa を下回る分圧を実現すれば数千時間は運転可能で あることが確認されている。この値は、現在の真空技術を利用すれば十分に実現可能なレベルであり、この プロセスによる NEA 表面への影響は克服されたといえる。

二つ目は NEA 表面形成のために吸着させた Cs-O 分子の熱的な脱離である。このプロセスはやはり時間と ともに進行し、かつその速度は温度が結合エネルギーに比べて高くなると急激に上昇する。本研究の成果か ら、このプロセスによる NEA 破壊は 330 K 以上で顕著になるが、300 K の室温程度では他の効果に比べて 無視できる程度であることが確認された。

三つ目はイオンの逆流衝突である。これは発生した電子ビームによりイオン化された残留ガスが NEA 表面に逆流衝突する現象で、引出された電子ビームの電荷量に従って劣化が進行する。大電流取り出しを考える場合、本プロセスが最も深刻であり、また前出の二つのプロセスの影響は克服できる見通しがついていることから、技術的に残された最後の課題と言える。このプロセスは発生するイオン密度に比例して進行することから、残留ガスの圧力に比例して進行し、かつ実効的なイオン化断面積にも比例すると思われる。このような前提のもとに、量子効率の変化は次のように記述される。

$$\eta = \eta_0 \exp\left(-\frac{\int PJdt}{\tau}\right)$$

と与えられる。ここで P は残留ガス圧力、J はビーム電流密度、τ は次のように与えられる。

$$\tau = \frac{ekT}{\kappa \int \sigma ds}$$

ここで*e*は素電荷、*k*はボルツマン定数、*T*は温度、κはイオン衝突による影響を表す係数、σはイオン化 断面積、積分は電子銃内のイオン逆流が生じる領域でとる。τは [C.Pa/m²] という次元を持つ量で、ビーム 電流密度と圧力の積分値にたいして、量子効率の減少具合を示す量である。この量を電荷寿命と呼ぶことに する。本研究では実験および解析を進め、NEA-GaAs フォトカソードにおけるこの電荷寿命量を実験的に求 めることに成功した。以下、それについて説明する。



図1:イオン逆流の影響係数kを電子の引出バイアスの関数として求めた結果

図1は実験より求めた影響係数 κ のバイアス、すなわち電子ビームの引出電圧の依存性である。ばらつき は大きいものの、100-1200 V の範囲で明確な電圧依存性は見られない。そこで、この影響係数が電圧に依存 しないと仮定すると、その平均値として $1.3 \times 10^{-13} m^2$ という値を得る。この値を利用して実際の電子銃にお ける電荷寿命を外挿により求めることにする。そのためには、ガス種を仮定し、そのイオン化断面積から発 生するイオン密度を求めなくてはならないが、残留ガスの主成分は水素であることがわかっているので、ガ ス種として水素を仮定する。水素をはじめとするイオン化断面積についての実用的な近似式は W. Lotz によ りみちびかれており、これを利用する。図2 にその計算結果をしめす。横軸は電子のエネルギーを eV で示 してある。



図2:水素原子のイオン化断面積の電子エネルギー依存性。W. Lotz のモデルより計算



図3:電荷寿命を電子銃のバイアス電圧の関数としてもとめたもの

図 2 にしめされたイオン化断面積と実験的に求めた $\kappa = 1.33 \times 10^{-13} \text{m}^2$ より、電荷量寿命 τ_c [C.Pa/m²] を求めた結果を図 3 に示す。横軸は電子銃のバイアス電圧である。電子銃のバイアス電圧をあげることで、イオン化断面積の減少により電荷寿命量は上昇することがわかる。ここでは電子銃の加速ギャップを 10 cm としている。バイアス電圧を 500 kV での電荷寿命は 1.9 × 10⁻³ C.Pa/m² である。スポットサイズとして 2 mm 半径、真空圧力として 1.0 × 10⁻¹⁰ Pa を仮定すると、1/e 寿命として 2500 C を得る。仮に 10 mA という大電流引出を仮定しても、2.5 × 10⁵ 秒という 1/e 寿命となり、三日間の運転が可能であることが示される。三日間という運転可能時間は充分に実用運転に耐えうる数字である。

1.2 RF フォトカソード電子銃開発

実証機のための電子ビームとして、RF電子銃による長パルス発生という方法を採用することにした。 DESY-FNAL で開発された L-band RF 電子銃を使用し、DESY での実績を上回る 1.0 ms パルスを 5 Hz で発生 させ、0.5% という 1 GHz を超える周波数の RF 電子銃としては世界最高の稼働率による運転を目指した。昨 年の報告書において、電荷量や稼働率など RF 電子銃の仕様のすべてを満たし、10 mA パルス内平均電流の 1 ms の電子ビームパルスを 5 Hz で生成することに成功した旨を述べた。

今年度は実験へのビーム供給を行いつつ、ビームチューニングの一環として、生成されたビーム性能の 評価を中心におこなった。電荷量や平均電流などの量的な指標はすでに仕様を満たす充分な値が得られて いるので、ビームの安定性、エミッタンスについて評価を行った。図4はビーム電荷量を Integrated Current Transformer (ICT) で測定し、ヒストグラムとして表したものである。この結果より、電荷量の平均値 56 pC に対して、rms の幅は 2.1 pC であり、相対的なビーム電荷安定度は 3.8% であった。このようなビーム電流 の揺らぎは発生 X 線量の変動を生ずるので望ましいことではないが、本プログラムにおいては積分 X 線量 が重要であるため、この程度の揺らぎは大きな問題ではない。一方で、超伝導加速においては入力パワーと 加速パワーはかならずバランスしていなくてはならないため、ビーム電流の揺らぎは加速勾配の揺らぎ、そ してエネルギー変動を生じる。このような変動を抑制するために STF の超伝導加速システムは RF フィード バックシステムを装備している。3.8% という変動は STF の RF フィードバックシステムのパワーマージン において、許容範囲内であるが、予定されている ILC の RF システムの仕様は満たしておらず、将来的には より厳しい安定化が求められる。



図4:発生したバンチ電荷量のヒストグラム

図 5 は BPM6 で測定したビーム位置をヒストグラムであらわしたものである。BPM6 は偏向電磁石下流に 設置されており、その X 方向の位置変動はエネルギー変動が支配的であるとみられる。この変動がすべて エネルギー変動由来であると仮定すると、エネルギー変動幅は相対値にしておよそ 0.08% となる。この値は STF における X 線生成実験にはほとんど支障がないが、ILC 加速器の仕様である 0.07% を若干上回っており、 将来的には改善が必要である。



図 5: PBM6(偏向電磁石下流)におけるビーム位置(a)水平方向、(b)垂直方向

最後にビームエミッタンスの計測結果について報告する。ビームエミッタンスは収束光学系によりビーム を絞り込んだ場合のビームサイズを決める量で、ビームの品質をあらわし、ちいさければ小さいほど高品質 であることを示す。図6はQスキャン法による測定結果の一例で、横軸は四重極磁石の電流、縦軸はビーム サイズの二乗である。測定されたエミッタンスは水平方向が0.8 mm.mrad、垂直方向が1.3 mm.mrad であった。 目標値は0.5 mm.mrad であるから、目標には及ばないが、近い値が得られている。測定したときのバンチ電 荷はおよそ35 pC である。



図 7: 仮想衝突点におけるエミッタンスの計測結果。Q スキャン法による測定で、横軸は四重 極磁石の電流、縦軸はビームサイズの二乗である

以上のように、本年度はビーム品質の評価を中心に行った。ビーム性能は STF における本プログラムに必要な性能を概ね満たしていることが確認された。その一方で、将来的な国際リニアコライダー計画のような 超伝導加速器を用いた大規模計画を想定した場合、より一層のビーム高品質化が求められることも明らかと なった。

5. 成果のまとめ

これまで5年間にわたり、大強度高品質電子源開発に取り組んできた。将来を見越した挑戦的課題と、実 証機のための課題に取り組んだ。

挑戦的課題であるフォトカソード DC 電子銃開発においては、500 kV という世界最高性能の DC 電子銃開 発(JAEA 等と共同)に成功し、大きな成果をあげることができた。また、NEA-GaAs フォトカソードの長 寿命化研究において、劣化プロセスの同定、プロセス毎の定量的評価を行い、三つの劣化プロセスのうち、 課題となるのはイオン衝撃のみであることをあきらかとした。また、イオン衝撃による劣化も、電子ビーム によるイオン化断面積がエネルギーの高い領域で漸近的にゼロとなることから、500 kV という実用機におい てはその効果は限定的であり、充分に実用に耐えうるものであることを示すことができた。

実証機のための L-band RF 電子銃は、FNAL(米国)、DESY(ドイツ)、JINR/IAP(ロシア)という海外との共同研究を最大限活用し、限られた時間でおおきな成果をあげることができた。10mA-1ms-5Hz という1 GHz を超えるフォトカソード RF 電子銃において世界最高の稼働率、パルス長、平均電流を実現し、仕様値をすべて満たすことができた。ビーム品質においても、本プログラムで必要とされる性能は概ね満たすことができた。一方で、ILC 国際リニアコライダー計画などの将来大型プロジェクトのためには、いくつかの点で改善すべき点があることも明らかとなった。

開発スタッフ

責任者:栗木雅夫(広島大学大学院先端物質科学研究科) 担当者:栗木雅夫(広島大学大学院先端物質科学研究科) 飯島北斗(広島大学大学院先端物質科学研究科)

C. 高圧 DC Gun 開発と入射部超伝導空洞開発

C-1. 直流高電圧要素開発 Development of Advanced High-Voltage DC System

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、本プロジェクトによって直流高圧電子源の研 究開発を進めている。日本原子力研究開発機構は電子銃本体の開発に注力し、日立ハイテクノロジーズは将 来の製品化を見据えて、電子銃の高電圧導入機構を小型化・高信頼化する技術開発を担当している。23 年 度に設計・製作した 500 kV 高電圧導入機構を、本年度は高電圧試験装置に実装し、耐電圧特性を評価した。 過電圧緩和の動作を原理検証するとともに、低抵抗単段碍子の耐電圧 1.33 kV/mm を確認した。

1. はじめに

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。日本原子力研究開発機構は、このような電子ビームの生成を目指して直流高圧電子源(DC電子銃)を開発している。実績ある構造として高電圧源とDC電子銃を、碍子を介して直付けした一体型構造を採用している。ガードリングを採用することで碍子表面への電子付着を防止し、従来の250 kVから500 kVへと耐電圧を大幅に向上した。

一方、米国トーマス・ジェファーソン国立加速器施設では、次世代光子源のDC電子銃として、電子銃と 高圧電源を高耐電圧ケーブルで接続する「Inverted Insulator」型を提案している。加速電圧 400 kV 以上の電 子顕微鏡でも高電圧源との一体型構造が一般的であったが、近年の1 MV 超高圧電子顕微鏡において顕微鏡 本体と高電圧源を高耐電圧ケーブルで接続する方式が実現できている。しかし、地絡放電時に発生する過電 圧に耐えるための大型・高コスト設計となっている。

日立ハイテクノロジーズは将来の製品化を見据えて、「Inverted Insulator」型を参考に DC 電子銃の高電圧 導入機構を小型化・高信頼化する開発に取り組んでいる。開発のポイントは以下の3点である。

(1) 電子銃と高圧電源を高耐電圧ケーブルで接続することで、装置配置の自由度・メンテナンス性を確保 する。

(2) 導電性を制御した高耐電圧碍子を採用し、電子付着起因の電位分布変動よる地絡放電を回避する。

(3) 地絡放電時の電圧振動に伴う過電圧を緩和する回路を開発し、絶縁破壊を回避する。

近年開発が進んでいる導電性を制御した高耐電圧碍子は、碍子表面の体積抵抗率を10^{7~12}Ω・cmに制御することで、電子付着による帯電の防止と4.5 kV/mmの沿面耐電圧を実現できている。ガードリング無しでも 安定した耐電圧化が期待でき寸法を最小化できる可能性がある。

このように優れたポテンシャルを有する関連技術が存在するが、次世代光子源の DC 電子銃に採用するまで には多数の技術的な課題を解決しなければならない。最先端の碍子メーカは単純形状の試験片において体積 抵抗率の高精度制御を実現している。しかし、高耐電圧碍子への組立てには、機械加工やロウ付けなどの接 合技術、洗浄や加熱脱ガス処理技術の確立が必須である。高耐電圧ケーブルでは特に端末部の構造と材質に よって耐電圧が大きく変動する。従って、部品レベル、処理レベルでの耐電圧評価により詳細な基礎データ を蓄積するとともに、実体系の高耐電圧碍子にて耐電圧評価する必要がある。

今年度は、23年度設計・製作した単段碍子と過電圧緩和回路からなる 500 kV 高電圧導入機構の特性を評価した。これらの成果を以下に述べる。

2. 高電圧試験装置の構成

開発した高電圧導入機構を実装した高電圧試験装置を図1に示す。(a)装置模式図、(b)装置外観図である。 電子銃を模擬した真空容器と300kV高圧電源を高耐電圧ケーブルで接続する。高耐電圧ケーブルにはイン ダクタンス調整用の強磁性体コアを設置する。接続部である高電圧導入機構の主な構成要素は、高耐電圧ケ ーブル端末と単段碍子、過電圧緩和回路である。碍子の先端にレーザー励起のカソードを設置することを想 定している。電圧印加の状態は過電圧緩和回路(10段分割)の第一段の電圧変化で計測し、真空計および Q-MSのデータと合わせてデータロガーに取り込む。高電圧印加の実験中は放電に伴いX線が発生するた め、2mm厚の鉛板を用いてシールドを施している。



(a) 装置模式図



(b) 装置外観図

図1:高電圧試験装置

3. 単段碍子の高電圧印加試験

3.1 試験碍子の構成

図 2 (a) に低抵抗セラミックス TA010 (京セラ製、堆積抵抗率~ $10^{8}\Omega$ ・cm)を用いて製作した全長 27.5cm の単段絶縁碍子を示す。300 kV 電源にて 500 kV 相当の耐電圧を試験するため、有効な碍子範囲を 60% に制限する SUS 製円筒電極を装着した。(a) の内部に挿入する分圧器(b) はプレート電極(Al 製、厚 さ 5 mm)を有効間隔 22 mm で 10 段積み重ねた構成とし、本高電圧印加試験においては分圧抵抗(各段 5.1G Ω)のみ実装した。





(a) 円筒電極付き単段碍子(TA010 低抵抗セラミックス)

(b) 分圧器(分圧抵抗のみ)

図2:単段碍子と分圧器の外観

単段碍子周辺の電界シミュレーション結果を図3に示す。SUS 製円筒電極は電界放出電子を防ぐため鏡面 仕上げを実施したが、(a)のように上端部での電界集中がある。電子が発生した場合には特に真空容器上部 でのX線発生に注意が要ることが分かる。詳細は次節で述べるが、実際に電界放出電子による連続的なX 線発生が認められたため、最終的にはSUS 製円筒電極を取り外した。その場合でも(b)に示すように、分 圧器により有効な碍子範囲を60%に制限出来ていることが分かる。碍子表面で電子が発生した場合に、特 に真空容器上部でのX線発生に注意が要ることは同様である。

3.2 試験結果

SUS 製円筒電極付き(a)、および取り外し後(b)の試験結果を図4に比較する。グラフの赤線は印加電圧、 青線は真空度である。真空度変化は真空容器内での放電と相関がある。円筒電極付き(a)では75 kV まで順 調に印加でき、80 kV において数度の微小放電の後、安定印加できた。しかし、85 kV では電界放出が持続し、 コンディショニング効果が得られなかった。

一方、SUS 製円筒電極を取り外すことにより 135 kV まで順調に印加できた。これ以降は電圧 1 kV 上昇後約 20 分間、微小放電が鎮まるのを持って 146 kV まで印加できた。147 kV では放電が暴走する兆候があり、146 kV に戻すことを 6 回繰り返した。7 回目で微小放電が鎮まる傾向が見られたが、突然真空度が劣化し電源がトリップした。



3.3 考察

図 5 (a) から低抵抗碍子への印加電圧を昇圧するとともに、120 kV 以上でベース真空度が上昇しているこ とが分かる。120 kV での真空度を基準とした増加量を図 6 に示す。124 kV まではほぼ線形であるのに対し、 125 kV 以上で急激に増加する傾向が見られた。前者が低抵抗碍子を流れる電流より脱離するガスによるのに 対し、後者は微小放電による電子あるいは X 線により真空計近傍の吸着ガスの脱離が重畳されたと推定して いる。



(a) 真空度



(b) ガス分圧





図6:高電圧試験結果

4. 過電圧緩和回路の特性試験

4.1 特性試験装置

図7に過電圧緩和回路の特性試験装置を示す。(a)は一体の過電圧緩和回路を試験した装置外観と試験回路である。(b)は高耐圧ケーブル等のインダクタンスを模擬する強磁性体カットコア(ファインメット)、(c)は過電圧緩和回路の単体基板である。



図7:過電圧緩和回路の特性試験装置

ファインメットの比透磁率 μ s = 5000 とすると断面積からインダクタンス L = 42 (μ H) であるが、巻数 N = 6 とすることで L = 1,520 (μ H) を得た。一方、用いた回路素子のパラメータを表 1 に示す。試験回路の 振動周波数 f は式 1 を用いて、基板単体で 0.43 MHz、一体で 2.4 MHz となる。表 1 には振動周期 T (ns) で 追記した。基板単体ではダイオードの逆回復時間 trr に余裕があるのに対し、一体では余裕が無い。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad \qquad \dots \dots \qquad (\not \exists 1)$$

回路素子	製品名	単体基板	1段	10段(一体)
抵抗器 R (MΩ)	RH1/8HV	415	1,245	12,450
コンデンサーC (pF)	CK2-Y5U1Kv/2200	90	30	3
ダイオード逆回復時間	SF5408	75	75	75
trr (ns)				
振動周期 T (ns)		2,300		420

表1:過電圧緩和回路の素子パラメータ

4.2 結果

試験は以下の3構成に対し、コア有無で放電時の電圧応答を測定した。

- (1) 基板単体に対して、ダイオード無し
- (2) 基板単体に対して、ダイオード有り
- (3) 放電緩和回路 10 段一体

表2に(1)(2)の測定結果をまとめた。時間軸は1µs/Divである。-1 kV印加しコンデンサーの充電が安定した後短絡(接地)した。青線が短絡のトリガー信号、黄色線が高電圧信号である。ダイオードおよびコア無し(a)においては電圧が負から正方向に大きく振動しているため、倍電圧による絶縁破壊の恐れがある。 ダイオードが有る場合(c)ではオーバーシュートの途中からダイオードの整流作用により振動が抑制できている。コアを入れることで振動周波数が低くなり(d)ではオーバーシュートが完全に抑えられた。

表3に(3)の測定結果をまとめた。ここでは-3kV印加しコンデンサーの充電が安定した後短絡した。コアが無い場合(a)では振動緩和効果が弱いがコアの効果(b)は確認できた。

4.3 考察

単体基板および一体の抵抗値が各々 415 MΩ および 12.45 GΩ であるのに対し、オシロスコープの高電圧 プローブの抵抗値が 100 MΩ であった。一体の試験の測定精度には高電圧プローブの改善が必要となるが、 単体基板の試験で過電圧緩和の効果が顕著に確認できたことから、回路の設計・製作に問題は無いと判断する。



表2: 放電緩和回路の基板単体試験



表3: 放電緩和回路の一体試験

5. 成果のまとめ

本プロジェクトを通して、装置配置の自由度・メンテナンス性に優れた、電子銃と高圧電源を高耐電圧ケ ーブルで接続する「Inverted Insulator」型の高電圧試験装置を立上げることができた。低抵抗セラミックス単 段碍子と過電圧緩和回路からなる 500 kV 高電圧導入機構の耐電圧特性を、本高電圧試験装置を用いて評価 した結果、耐電圧 1.33 kV/mm(29.2 kV/段)を確認した。分圧器装着時に単段碍子と接触することで発生す る碍子汚損を防止することで目標の 50 kV/段を実現できる可能性が見えた。また、単体基板の短絡試験に より過電圧緩和回路の性能を確認できた。

但し、「Inverted Insulator」型を構成する低抵抗セラミックス単段碍子や過電圧緩和回路は原理検証された 段階である。実機適用には信頼性の向上とコスト低減等を進める必要がある。

開発スタッフ

責任者:小瀬洋一(日立ハイテクノロジーズ) 担当者:加賀広靖、渡辺俊一、村越久弥、金田実(日立ハイテクノロジーズ)

C-2. 直流高圧電子源開発 Development of High-Voltage DC Electron Guns

概要

将来の高輝度小型光子ビーム源の要素技術として、直流高圧電子源の研究開発を行った。前年度までに本 業務で製作した電子源装置をビーム引き出し可能な条件に設定し、高電圧印加試験を行った。電極形状の変 更による表面電界低減の効果により、550 kV までの電圧印加に成功した。この電子源をビームラインに接 続してビーム生成試験を行い、500 keV-1.8 mA 電子ビーム生成と 180 keV-10 mA 電子ビーム生成に成功した。 目標としていた 500 keV および 10 mA ビーム生成の実用化試験に成功した。10 月には電子源装置を KEK の コンパクト ERL に移設し、超伝導加速器との接続を行った。

1. はじめに

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。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(光陰極 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)光陰極はレーザを半導体に照射して光電子を発生 するので、モードロックレーザからピコ秒の電子パルス列を直接生成し超電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1に開発した光陰極 DC 電子銃の構成を示す。光陰極は陰極先端にインストールされており、陰極・陽 極間に DC 電圧が印加されている。外部レーザーを光陰極に照射すると、光電子が生成され DC 電圧でビー ム加速される。加速エネルギーを 500 keV 以上にすることで電子銃出射後の空間電荷効果によるビーム品質 (エミッタンス)劣化を抑制する。陰極 - 陽極間隔を狭めて素早く加速することも、出射前の品質劣化抑制 のために重要である。これら高品質ビーム生成条件を満たすには、図1に示すように絶縁セラミック加速管 の高電圧端子に接続されたサポート電極が陰極を支える構造となる。この高品質ビーム生成に必要不可欠な 構造こそが、電子銃の高電圧化を阻んできた大きな要因である。その理由は、印加電圧の上昇と共にサポー ト電極と陰極から電界放出電子が発生し、周囲の容器面との間で放電を引き起こすからである。我々は米国 ジェファーソン研の運転実績 350 kV を大きく上回る 500 kV 電子銃の開発を進め、基本構造を変えずに放電 問題を解決することに取り組んだ。

最初にサポート電極からの電界放出電子問題に取り組んだ。従来型の単絶縁セラミック管では、サポート 電極から発生した電界放出電子が直接セラミックに衝撃するため、チャージアップによる放電や、極端な場 合にはセラミック管の破損に至ることがあった。我々は独自の多段絶縁セラミック管を提案し、各段の電極 から延びる金属性ガードリングでセラミックを電界放出電子から防御した。これにより平成21年度に世界 で初めてサポート電極をつけた状態で500 kVの安定な印加に成功した。

次に、電子ビーム生成を目的として陰極をサポート電極と接続したところ、陰極からの電界放出電子に起 因する新たな問題が発生することが前年度までに判明した。それは、真空容器面上の微細粉塵が放電により 帯電し、陰極に固着して暗電流を発生する問題であった。放射線発生を伴う有害な暗電流を除去するため、 電子銃装置を1ヶ月程度かけてリセットしたが、その後の電圧印加試験中にも再び暗電流が発生し、この問 題の解決なくして500 kV印加を達成できないことが判明した。微細粉塵の完全除去による解決が理想的だが、 真空容器の体積が大きいことから断念せざるを得なかった。

今年度は暗電流問題への対策として、1) クリプトンガスコンディショニングと2) 電極形状の変更による

表面電界低減を実施して障害の解決を図った。その結果、3)550 kV までの高電圧印加に成功した。そして、 光陰極 DC 電子銃をビームラインと接続して、4-1)500 keV-1.8 mA のビーム生成、4-2)450 keV-1 mA での 長時間ビーム生成による光陰極寿命測定、4-3)180 keV-10 mA のビーム生成試験に成功した。これにより、 目標としていた 500 keV ビーム生成と 10 mA ビーム生成を達成し実用化試験を終えた。KEK のコンパクト ERL でのビーム引き出し試験を行うため、10 月からは装置の移設作業を行い、超伝導加速器との接続を行 った。これらの成果を以下に述べる。



図1:開発した直流高電圧電子源

2. クリプトンガスコンディショニング

暗電流問題を解決するために、クリプトンガスコンディショニングを実施した。前年度のヘリウムガスを 用いた実験の続きである。図2左に示すように、ガス圧と時間を変えながら電圧を印加した。ガスコンディ ショニングでは、イオン化したガスが加速され、暗電流の源を衝撃して消滅させることを目的とする。計4 回のガスコンディショニングのガス圧とコンディショニング時間は1×10³ Paで1時間(1回目)、3×10³ Pa で0.5時間(2回目、3回目)、6×10³ Paで0.5時間(4回目)であった。コンディショニング後に、高電圧 の関数として放射線を測定して効果を確かめたところ、図2右に示すようにわずかな改善は見られたものの、 500 kV の電圧で放射線の出ない状態にすることは、ほぼ不可能であると結論付けた。前年度のヘリウムガス コンディショニングの結果と合わせ、ガスコンディショニングは多段セラミックを用いた直流電子銃では効 果がなく、暗電流の源を消すことが出来ないと結論づけた。



図2:クリプトンガスコンディショニング。左図は時間の関数として電子銃高電圧(赤)、放射線(青)、真空度(緑)をプロットした。ガス圧と時間を変えて、計4回コンディショニングを実施した。各コンディショニング後に、その効果を確認するために高電圧の関数として放射線を測定した(右図)。ガスコンディショニングの効果はないと結論付けた。

3. 陰極形状の変更

電子銃から高品質ビームを生成するために重要なのは、加速エネルギーを 500 keV 以上にして加速後の空 間電荷力によるエミッタンス劣化を防ぐとともに、加速中の空間電荷力によるエミッタンス劣化を防ぐこと である。そのためには、空間電荷力の影響の強い低エネルギー部で、素早く加速する必要がある。すなわち 電子ビームの生成する光陰極面上で高電界であることが重要である。図 3a)に電子銃真空容器の断面図を示 す。陰極面上の加速電場は、陰極と陽極間距離を示すギャップ長 d と陰極の曲率半径 r で決定されるが、幾 何学的な効果により主に効くのは r である。ギャップ長 d を増やしても、陰極面上の電場はあまり変化せず に平均加速電場が d に比例して減るので、陽極面上の電場が大きく減ることになる。ここでは、この陽極面 の電場減少による暗電流問題の解決を試みた。

電圧印加中に突然発生する暗電流問題を解決するには、真空容器中の微細粉塵の帯電メカニズムを理解す る必要がある。微細粉塵を直接帯電させるには電界放出電流だけでは小さすぎるので、我々は次のような仮 説を立てた。図4左に示すように、陰極からの電界放出電子が電子銃容器に衝突するとガスを発生する。こ のガスがイオン化して陰極に衝撃し、2次電子を発生させると放電の連鎖が起きる。この結果、小さな電界 放出電流が微細粉塵を正に帯電させることのできる大きな放電に成長するという仮説である。この仮説に基 づき、ガス発生の抑制とそのイオン化を防ぐ工夫を行った。ガス発生の抑制には、図4右に示すように加速 電極の周囲を非蒸発型ゲッターポンプで覆う独自のポンプ配置を採用していたので、それを利用した。ガス のイオン化は、電子銃容器表面でのマイクロプラズマの発生などによると考えられるので、容器表面の電界 を半分に下げるため、電極ギャップ長dを100 mm から160 mm に伸ばした。陰極の曲率半径は67 mm のま まとしたが、光陰極表面の電界の減少は1割程度であり、ビームエミッタンスの劣化を最小限にすることが できた。 電極ギャップ長dの延長に伴う陰極面上の電場変化について、静電場計算を行った結果を図5に示す。 100 mm から160 mm と、大きくギャップ長を伸ばしたにも関わらず、陰極面上での電場変化は最大10% 程 度であることがわかる。同じ計算で求めた陽極面上の電場変化を図6に示す。Z>700 mm では、電場が半分 程度に減っていることがわかる。



図3:電子銃真空容器の断面図(a)、陰極の写真(b)、ギャップ長d=160mmの時の静電場計算(c)。静電場計算のZ軸は真空容器の中心対称軸、R軸は容器の動径軸を表す。



図4:電子銃陰極からの電界放出電子に起因する大放電の仮説とその対策。電子銃陰極からの電界放出電子 により容器表面の吸着ガスが脱着、イオン化して陰極を衝撃すると2次電子を放出する。この放電の連鎖に より大放電が生じると考えた(左)。その対策として、陰極と陽極間の加速ギャップ周囲に非常発型ゲッタ ーポンプを配置するとともに、加速ギャップを広げて陽極表面の電界を下げる工夫を行った。



図 5: ギャップ長 d の違いによる陰極面の電場変化。a) 図は d = 160 mm の時の静電場計算結果の等電位の等 高線を表す。b) 図は Z = 300 ~ 600 mm について、陰極の電圧が 500 kV 時の表面電界を d = 100 mm (青) と 160 mm (赤) についてプロット。c) 図は同じく Z = 550 ~ 630 mm についてプロット。ただし、d = 100 mm の時は光陰極面の Z が異なるため、比較のため 60 mm シフトさせてプロットしている。電場変化は1 割程 度にとどまっていることがわかる。



図 6: ギャップ長の違いによる陽極電場の変化。Z>730の陽極電場はギャップ長の違いで大きく変化し、 Z=820では半分になる。
4. ビーム生成条件下での高電圧コンディショニング

ギャップ長 160 mm での高電圧コンディショニングの結果を図 7 に示す。延べ 200 時間ほどのコンディシ ョニングを経て 550 kV 達成に成功した。また暗電流の発生も確認されなかった。最高電圧である 550 kV で は 10 分間無放電で保持することが出来た。前章の放電モデルに対する対策として、陰極電場を 1 割、陽極 電場を半分に減らしたが、その効果が証明されたことになる。これにより、ビーム生成条件下での高電圧印 加技術を確立した。

平成21年度のサポート電極のみの実験結果や、昨年度までのビーム生成条件下での高電圧コンディショ ニングの経験からは、550 kV で10分間保持することができれば、それより40 kV 低い電圧である510 kV で は8時間以上の無放電保持が出来るはずである。しかし、今回の結果では510 kV では40分間保持が最長で あった。さらに、低い電圧である390 kV でも2~3時間程度しか保持できなかった。この原因については 現在も調査中である。

高電圧電源とセラミック管の間の出力抵抗は、高電圧コンディショニング時は 100 MΩ である。セラミッ ク管の外部抵抗は 5 GΩ であるので、電源電圧 510 kV の時のセラミック管への印可電圧は 500 kV である。



図 7: ビーム生成条件下での高電圧コンディショニング。横軸は延べコンディショニング時間、上図は高電圧、 下図は真空度を表す。

5. ビーム生成試験

電子銃の高電圧コンディショニングに成功したので、図8に示すビームラインを電子銃下流に接続してビ ーム引き出し試験を行った。電子銃直後のソレノイド電磁石により、ビームサイズを調整する。レーザー導 入容器は光陰極面上にレーザーを輸送すると共に反射レーザー光を外部に取り出す装置で、窓とミラーで構 成されている。差動排気真空容器は、大電流のビームがビームダンプで生成するガスの電子銃への逆流を防 ぐ装置である。入口と出口は直径 30 mm、長さ 30 mm のオリフィスが取り付けられており、コンダクタン スによりガスの逆流を防ぐ。容器内には非蒸発型ゲッターポンプ(WP38/950 St707、SAES getters)が 8 個設 置されておりガスを強力に排気する。偏向電磁石でビームを曲げることも、電子銃へのガスの逆流を防ぐの に役立つと同時にビームのエネルギー校正にも用いることができる。デフレクター電磁石は、ビームダンプ でのビームサイズを広げて熱の集中を避ける目的で設置した。交流電源を用いて、ビームを上下左右に走査 することで、ダンプ上でのビームサイズを mm サイズから数 cm サイズに広げた。ビームプロファイルモニ タは小電流運転時のビームサイズ、位置、形状の確認に用いる。ビームダンプはセラミック管を介して接地 されているビームラインに接続されている。1 kΩの抵抗をビームダンプとビームラインに接続して、その 電圧を測定することでビームダンプ電流を測定した。ビームダンプの周囲には 10 cm 以上の厚みを持つ鉛ブ ロックを積んで、500 keV-10 mA ビームの発生する放射線を遮蔽できるようにした。

レーザー導入真空容器は、400-800 nm 波長で AR コートを施した合成石英ビューポート(浜松ホトニクス 製)と銀コーティングモリブデンミラー(Rocky Mountain Instrument、Co製)を備えている。ミラー中心か ら GaAs 光陰極までの距離は約 630 mm、ビーム軸に対するレーザーの入射角は約 2.3 度である。GaAs 光陰 極を電極にインストールした状態で測定した、入射窓直前と出射窓直後のレーザーパワーの比は 20% 程度 であった。GaAs 光陰極のλ=532 nm のレーザーに対する反射率の実測値は 32% 程度であったことから、レ ーザー導入容器のミラーやビューポートでレーザーロスが生じていると考えられる。

波長 532 nm のレーザーで 10 mA 引き出すには、2.3 [W%] のレーザーと光陰極を組み合わせる必要があ り、ワットクラスの高出力レーザーが必要となる。そこで、最大出力 5 W の半導体レーザー (λ = 532 nm) Millennia Pro (Spectra Physics 社製)を用いた。レーザービームライン上に設置した偏向板を回転させ、レーザ ー出力をリモート切り替えできる。レーザーは光陰極中心に照射し、集光ミラーを用いてサイズを σ = 0.1 mm にした。

高電圧電源とセラミック管の間の出力抵抗は高電圧コンディショニング時は 100 MQ であるが、大電流ビ ーム生成試験時は 66.6 kQ に変更する。出力抵抗での電圧ドロップの影響を防ぐためである。



図8:電子銃下流ビームライン

5.1 500 keV ビーム生成試験

図9にアルミナ蛍光板ビームプロファイルモニタで計測したビーム形状を示す。左はデフレクター電磁石 オフ時のプロファイル、右はオン時のプロファイルである。中心穴径は直径2mmである。ビームサイズは デフレクター電磁石オフ時に数mm、オン時には2cm角に広がっており、デフレクター電磁石からの距離 が約2倍に位置するビームダンプでのビームサイズは4cm程度と考えられる。小電流でビームプロファイ ルを確認してデフレクター電磁石でサイズを大きくしたのちに、大電流運転を行った。

図 10 に 500 keV ビーム生成試験の結果を示す。横軸は時間(分)で上図が電子銃高電圧(青)、ビームダ ンプで測定したビーム電流(赤)、下図が電子銃真空度(赤)、ビームダンプ真空度(青)、放射線(緑)を示す。 レーザーパワーは偏光板の回転によりコントロールしているため、階段状にビーム電流が増えていることが わかる。500 keV ビームを最大 1.8 mA まで生成することに成功した。

この試験では 10 mA のビーム生成を目指して比較的短時間に電流を増やした。ところが、2.2 mA 以上で は電圧がドロップすることが判明した。3回試験を繰り返したが同じ結果が得られ、高電圧電源の容量不足 であると結論付けた。図 10 の丸で囲った部分では電圧が 500 kV から 494 kV にドロップしている。電圧降 下に伴いビームエネルギーが変化すると偏向電磁石での偏向角が変わるため、ビームダクトにビームが衝突 して多量の放射線を発生するとともに、真空の劣化や放電を引き起こす。3回目の試験後に、放電の影響か らか 500 kV の電圧印可ができなくなったため、長時間ビーム生成試験を実施することはできなかった。

放射線は電子銃近くに設置した NaI 放射線検出器で計測した。もともと電子銃本体の放電をモニターする 目的で設置したのだが、ビーム生成時の放射線量が予想以上に多かった。ビームの外側に薄く広がるビーム ハローの影響かとも思われたが、偏向電磁石下流のビームダクトの遮蔽強化によりこの放射線が低減するこ とが判明したため、ビームラインの放射線遮蔽不足による影響と結論付けている。ビームダクトは遮蔽がで きないため、ビームダンプからの2次電子や反跳電子がビームラインに戻り、ビームダクトに衝突して放射 線を発生すると考えている。





図 9:500 keV 電子ビームのビームプロファイル。アルミナ蛍光板を用いて測定した。左はデフレクター電磁石をオフ時のプロファイル、右はオン時のプロファイル。中心穴のサイズが直径 2 mm である。



図 10:500 keV 電子ビーム生成試験。横軸は時間(分)で上図が電子銃高電圧(青)、ビームダンプで測定 したビーム電流(赤)、下図が電子銃真空度(赤)、ビームダンプ真空度(青)、放射線(緑)を示す。

5.2 光陰極電荷寿命測定

図 11 に示すように、エネルギー 440 keV と 450 keV、ビーム電流 1 mA 程度で長時間の運転試験を行い、 光陰極寿命の測定を行った。レーザーパワーを徐々に増やしながら電流を上げてゆき、1 mA を越えたとこ ろでレーザーパワーを固定した。始めの 10 分程度は徐々に電流が増加したが、やがて下がり始めた。電流 を出し始めてから 30 分程度で光陰極の電荷寿命測定に十分なデータを取得できたため、ビーム生成試験を 終えた。電流の減衰カーブから GaAs 光陰極の 1/e 電荷寿命 46C が得られた。

レーザーを電極中心から外して電子ビームを生成する、オフセンター運転により電荷寿命を延ばすことが できることが知られている。レーザーサイズ σ = 0.1 mm という今回の実験条件に近い米国ジェファーソン研 究所のデータでは、5 mm オフセンター運転で最大 600C が得られるものの、オンセンター運転では 100C 以 下となり我々の 46C と大差ない。今後、寿命を長くするには、オフセンター運転とビームダンプでの真空劣 化の抑制が重要である。

長寿命化には光陰極を変更するオプションもある。米国コーネル大ではマルチアルカリ K₂CsSb 光陰極を 用いて、20 mA のビームをほぼ連続 8 時間運転することに成功している。運転前後で QE の劣化はほとんど 見られていないし、波長 530 nm のレーザーを使う限りにおいては、エミッタンスも GaAs 光陰極と大きな 違いはない。



図 11:450 keV 電子ビーム生成試験。横軸は時間(分)で上図が電子銃高電圧(青)、ビームダンプで測定 したビーム電流(赤)、下図が電子銃真空度(赤)、ビームダンプ真空度(青)、放射線(緑)を示す。

5.3 10 mA ビーム生成試験

図 12 に 10 mA ビーム生成実験の結果を示す。電子ビームエネルギーは 180 keV であった。ビームダンプ の電流を測定しながら、入射レーザーパワーを増やし、徐々に電流を増やした。10 mA 時のレーザーパワー は 1.6 W であり、GaAs 光陰極の QE は 1.5% であった。放射線は実験室のエリアモニタと、レーザー導入真 空容器そばに設置してある GM 放射線検出器(TGS-R74-22759、ALOKA)を用いてモニタした。図 12 に示 すようにダンプ電流 10 mA で 2 分程度キープすることができたが、その後は急速に電流が減少し、やがて 高電圧電源がインターロック信号により突然トリップした。高電圧電源とコッククロフトウォルトン電源を つなぐ配線コネクタの発熱が原因と考えている。

ビームダンプの真空度は 10 mA 運転時に 7.6×10⁵Pa まで上昇し、電子銃の真空度は 2.4×10⁸Pa まで上昇 した。図 8 に示す差動排気真空容器の設計では、大電流運転時のビームダンプ真空度を 1×10⁵Pa と仮定し、 電子銃へのアウトガスの逆流は問題ないと考えていた。ところが、ビームダンプの真空が仮定値より 1 桁程 度悪化し、電子銃の真空度を 10⁹パスカル前半に保つのが困難である。この対策として、ビームダンプのベ ーキング温度増が考えられる。米国ジェファーソン研究所ではビームダンプを 450°C -24 時間ベークしてい るが、我々は 250°C -24 時間程度であった。



図 12:10 mA 電子ビーム生成試験。横軸は時間(分)で上図が電子銃高電圧(青)、ビームダンプで測定したビーム電流(赤)、下図が電子銃真空度(赤)、ビームダンプ真空度(青)、放射線(緑)を示す。

6. 成果のまとめ

平成 20 年度から5 年間にわたり直流高圧電子源の開発を行った。サポートロッドや陰極から発生する電 界放出電流に起因する暗電流生成のため、350 kV以上での電子銃運転はこれまで世界で実現されていなか った。そこで、まずサポートロッドからの電界放出電流問題の解決に取り組み、独自のガードリング付多段 絶縁セラミック管を用いて、サポートロッドをインストールした状態で世界初の 500 kV 高電圧の安定印加 に平成 21 年度に成功した。平成 22 年度からは、陰極をインストールしてビーム引き出し試験を行うと共に、 陰極からの電界放出電流問題の解決に取り組んだ。独自の工夫として、陰極と陽極間の加速ギャップ周囲を 非蒸発型ゲッターポンプで覆う真空ポンプ配置、陰極の形状配置の工夫による陰極と陽極表面電場の低減を 行った。これにより、平成 24 年度にはビーム引き出し条件下での 500 kV 高電圧印加に成功した。引き続い てビーム生成試験のためにビームラインと接続し 500 keV 電子ビームを 1.8 mA の大電流で引き出すことに成 功した。さらに、180 keV において 10 mA 電子ビーム生成にも成功した。当初の開発目標であった 500 keV および 10 mA ビーム生成をそれぞれ独立に達成した。

最も困難な開発課題であった高電圧化の他に、光陰極の調製や電子銃容器の極高真空度の実現にも取り組 んだ。光陰極には半導体 GaAs(ヒ化ガリウム)を採用し、水素洗浄装置による GaAs 表面の洗浄技術を確立し、 平成 22 年度には GaAs 光陰極の静的寿命 2000 時間を達成した。運転状態におけるビーム引き出し 1/e 電荷 寿命で 46C を達成している。真空については 1 × 10⁻⁹Pa 以下の真空度を平成 22 年度に実現し、こちらも当初 の目標を達成している。

平成24年10月には高エネルギー加速器研究機構 cERL への移設を行い、超伝導加速器への接続を行った。

開発スタッフ

責任者:羽島良一(日本原子力研究開発機構) 担当者:永井良治、西森信行(日本原子力研究開発機構)

C-3. 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 Development of CW Superconducting Accelerator Cavity used with DC High Voltage Electron Gun

概要

将来の高輝度小型光子ビーム源の要素技術として、直流高圧電子源と組み合わせて使用する CW 超伝導 加速研究開発を進めている。平成 24 年度は、空洞から取り出した加速に有害な高調波(HOM)を吸収する HOM ダンパー実機を製作し、超伝導空洞とともにクライオモジュールに組み込んで超伝導加速器モジュー ルを完成させ、冷却試験を行って HOM 特性などの測定を行った。HOM ダンパーが超伝導加速器の運転に おいても、十分機能することを確認した。

1. はじめに

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 CW 超伝導主加速器で安定に加速す るためには、ビーム加速によって励起される空洞の高次モード(Higher-Order Mode: HOM)を抑制するこ とが重要である。そのため平成 23 年度まで、HOM ダンパー実機を製作する際に重要な温度特性や、HOM ダンパーの変形による伝熱特性の変化などを HOM ダンパー試作機を用いて調べた。さらに HOM 吸収体の 冷却サイクルに対する耐久性を調べるために室温から低温への冷却サイクル試験を行った。平成 24 年度は これらの結果を踏まえて HOM ダンパー実機を製作し、超伝導加速器モジュールに組み込み、冷却試験や超 伝導空洞の HOM 特性試験を行った。

2. HOM ダンパー実機の製作と超伝導加速器モジュールへの組み込み

平成 24 年度は 2 台の 9 セル超伝導空洞を持つ超伝導加速器モジュールを製作した。9 セル超伝導空洞は空 洞内で励起された HOM を効率よくビームパイプを伝搬させ、HOM ダンパーで吸収させるため、2 つの異な るビームパイプ径を持っている。入力カップラーを取り付ける側が φ 100 の SBP (Small Beam Pipe) で、そ の反対側が φ 123 の LBP (Large Beam Pipe) である。2 種類のビームパイプ径を持つ超伝導空洞 2 台を、SBP でつなぎ合わせる形で組み立てるため、HOM ダンパーは、SBP 用が 1 台、LBP 用が 2 台必要になる。各 HOM ダンパーの構造は径方向の寸法は異なるが、基本的な構造は同じで、HOM を吸収するため銅円筒内面 に HIP 処理されたフェライト吸収体、冷却ひずみを吸収する櫛歯型 RF ブリッジおよびベローズ、フェライ トでの発熱を冷却するための 80 K アンカー、2 K 部分への熱侵入を減らすための 5 K アンカーで構成されて いる。(図 1)



図 1: HOM ダンパー実機

HOM ダンパー実機は、クリーンルームで洗浄、乾燥させたのち、9 セル超伝導空洞、入力カップラーと ともに超伝導加速ユニットとして組立作業を行った。(図 2)

LBP用HOMダンパー SBP用HOMダンパー LBP用HOMダンパー

超伝導加速空洞

組み立てられた超伝導加速ユニットは、冷却配管、断熱シールド、磁気シールドおよびセンサー等が取付 けられた。

HOM ダンパーは中央部に 80 K アンカーが、超伝導空洞とつながるフランジ側には 5 K アンカーが設けら れている。80 K アンカーは、HOM ダンパーの周りに配管せれている 80 K 窒素配管にブレード線を用いて 接続される。5 K アンカーは超伝導空洞をセットする5 K フレームからブレード線を用いて接続される。(図3)



図 3: HOM ダンパーの冷却配管等への接続。(左) SBP 用 HOM ダンパー、(右) LBP 用 HOM ダンパー

超伝導加速ユニットは断熱真空槽の中に組み込まれ、超伝導加速器モジュールとして完成し、冷凍機シス テムに接続された。(図 4)

液体ヘリウムおよび液体窒素を用いて冷却試験が行われ、超伝導空洞は2Kに、HOMダンパー中央部は 80Kに冷却されることを確認した。

図2:超伝導加速ユニットの組立



図4:超伝導加速器モジュールの外観図

3. 超伝導加速器モジュールの冷却試験と HOM ダンパー性能試験

2 台の超伝導空洞の間に設置された SBP 用 HOM ダンパーの 80 K アンカー上側にヒーターが取り付けて ある。これはビーム加速によって励起された HOM がフェライトで吸収された時に熱となるが、ビームがな い状態でもこの状況を模擬できるようにしたもので、HOM ダンパーでの発熱がブレード線、80 K 窒素配管 を通して十分に除去できるか、また 2 K 部分への入熱は問題ないかを確かめることができる。超伝導加速器 モジュールを十分に冷却し、ヒーターで 30 W の発熱を 45 分間行った時の温度変化を図 5 に示す。

HOM ダンパー中央部では、80 K アンカーの温度が 13 K 程度上昇しているが、ビームパイプ温度の上昇 は 0.01 K 以下であり、超伝導空洞での温度上昇は見られず、HOM 吸収による温度上昇によって、2 K 部分 への入熱はほとんどないと考えられる。



図5:SBP用HOMダンパーのヒーター試験による温度上昇

HOM ダンパーによる空洞の HOM 特性の測定も行った。ネットワークアナライザーを用いて測定できる ように、入力カップラー部分に導波管-Nコネクター変換器を取付け、ここを高周波の入力ポートとした。 ピックアップポートおよび HOM 測定のために LBP 用 HOM ダンパーと超伝導空洞の間に3つの HOM ポー トが取り付けられているが、その中から1つを選び出力ポートとした。1つの空洞について4種類の組み合 わせで測定を行った。各 HOM の周波数とその負荷Q値を図6に示す。超伝導空洞を設計した時に、3次元 電磁界シミュレーションコード MAFIA を用いて計算した各 HOM の周波数とQ値も合わせて示してある。 測定値は計算値とほぼ同じ傾向であり、特にQ値が高くビーム不安定性を引き起こしそうな HOM はなく、 HOM ダンパーは超伝導加速器の運転においても、十分機能すると思われる。



図 6: 超伝導空洞の HOM の周波数とQ 値

4. 成果のまとめ

直流高圧電子源と組み合わせて CW 超伝導加速空洞を使用する場合、ビームを安定に加速するためには、 空洞で励起される HOM を抑制することが重要である。そのためには HOM が励起しにくい空洞であるだけ でなく、励起した HOM を効率良く吸収するための HOM ダンパーが必要である。HOM ダンパーは超伝導 加速空洞の間に設置されるため低温での使用になる。そのため低温でも十分な HOM 吸収特性があるだけで なく、超伝導加速空洞への熱負荷の少ない構造であることが重要である。

これまで低温でのフェライトの高周波吸収特性や伝熱特性の試験を重ね、実機製作に必要な改良を行って きた。そして HOM ダンパー実機を製作し、これらを超伝導加速器モジュールに組み込み、CW 超伝導加速 器に必要な HOM ダンパーを完成させた。

開発スタッフ

責任者:羽島良一(日本原子力研究開発機構) 担当者:沢村勝(日本原子力研究開発機構)

D. パルスレーザー蓄積装置開発 Development of Compact Laser Super-Cavity for High Flux X-ray

概要

本事業は、パルスレーザーを共振器内に蓄積・集光し、高効率でレーザー電子散乱を起こすための、3次 元4鏡リング型レーザー蓄積共振器の開発である。平成24年度は、KEK-ATF加速器へ導入した3次元4 鏡共振器を用いた、レーザー蓄積、及びガンマ線生成実験を行った。特に、系統的なデータ収集と共振器の 状態測定により、共振器の性能を定量的に評価した。平行して共振器のデジタル制御システムの開発を行い、 それによる共振器制御とガンマ線生成に成功した。

事業の概要

本事業では、パルスレーザーを共振器内に蓄積し、レー ザー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。このため、平成21年度より継続して、4枚の鏡から なる3次元リング型の共振器(3次元4鏡共振器)の開発 を行ってきた。4鏡共振器の鏡を平面上に配置すると、鏡 を配置した面と、それに垂直な面においてレーザーの焦点 距離が異なり、非点収差が生じることが知られている。非 点収差が大きいと、集光点においてレーザー光の形状が楕 円形となり、レーザー光の集光が困難となるため、レーザ ー電子散乱の高効率化には不向きである。これを軽減し、 集光点においてレーザーの形状を改善する方法として、4 枚の鏡を立体的に配置する方法がある。本事業ではこの方 法による、レーザー蓄積強度の増大と集光性能の向上を念



図1:ATF加速器に設置した3次元4鏡共振器の写真。ATF加速器の運転に支障をきたさないように、真空容器内に設置している。

頭においた開発を行った。また、鏡を立体的に配置することによって、共振器内におけるレーザー光の状態 に幾何学的位相が生じ、3次元4鏡共振器は円偏光状態にのみ共振することが知られているが、本研究開発 においてこの特徴を用いた新しい共振器制御方法を見いだした。

平成 23 年度までに、新しい方法による共振器制御技術の開発、3 次元 4 鏡共振器の製作と KEK-ATF 加速器(以下 ATF)への設置、およびこのシステムによる、レーザー電子散乱ガンマ線の確認を行った。平成 24 年度は、レーザー蓄積強度の向上とそれによるガンマ線生成強度の向上を目指した。また製作した 3 次元 4 鏡共振の性能を定量的に測定し、その動作状態の正確な把握と設計の妥当性の検証を行った。これは将来の高強度のレーザー蓄積に向けた重要な過程である。さらに開発試験を継続していた、デジタル制御システムを ATF における実験に導入し、デジタル制御システムの有効性を検証した。

2. 平成 24 年度の開発事業

2.1 レーザー蓄積率の増大

図2は、3次元4鏡共振器およびその偏光特性を用いた共振器制御の構成である。

本システムの制御は3次元共振器が右円偏光または左円偏光のどちらか一方にしか共鳴しないことを利用 する。共振器に直線偏光レーザーを入射し、共振器内部の円偏光成分と、共振器からの反射光の円偏光成分 の位相差を検出することによって共振器の共鳴状態をモニターする。共振器内部のレーザー光は直線偏光し た入射レーザーに含まれる、左右どちらか一方の円偏向成分のみであるため、原理的に入射レーザー光をす べて蓄積することができない。入射レーザーが完全な直線偏光の場合、共振器内部に入るのは最大で入射 レーザー光の2分の1である。これを改善するため、入射レーザーを楕円偏光として、意識的に、左右偏 光成分の比率を変えることにより、共振器に蓄積するレーザーの強度を増大させた。図2はその様子も表しており、入射レーザー光は左円偏光成分強度が高い。図3は測定した蓄積強度の分布である。平均蓄積強度は 2.6 kW となっている。これは入射レーザー光の強度の増大率約 1200 に相当する。強度分布の幅から 推定される蓄積強度の揺らぎ 35 W である。レーザー強度のゆらぎは共振器長の共鳴状態からのずれを反映 する。蓄積強度の揺らぎ 35 W を共振器長に換算すると4 pm であり、これは 1.64 m の共振器の周長を4 pm (相対精度 2 × 10⁻¹²)の精度で制御できていることを意味する。

共振器内におけるレーザー光強度の増大に伴い、蓄積強度が共振器の状態に影響する様子が観測され始めた。図4-aに制御開始後からの蓄積強度の時間変化を示す。図から分かるように、制御開始から数秒間のうちに蓄積強度が減少している。この原因として、共振器の鏡の熱による変形が考えられる。図4-bは、共振器長を連続的に変化し、共振状態になった時に測定した共振器からの透過光の形状である。これは、共振器長の制御開始直後の状態を表していると理解できる。図4-cは共振器長の制御を行った状態である。透過光の形状が変化していることが分かる。この変化が鏡の熱による球面鏡の曲率半径の変化と仮定して、鏡における損失を見積もると、鏡における強度損失はおよそ100 ppmと推定される。



図2:3次元4鏡共振器の偏光特性を利用した、共振制御の構成(左)と制御装置からえられる共振器の 制御信号(誤差信号)右。蓄積強度増大のため、左右偏光強度を意識的に非平衡にしている。



図 3: レーザー共振器内に蓄積されたレーザー 光の強度分布。平均 2.6 kW、揺らぎ幅は 35 W を達成している。



図4:共振器制御開始からの蓄積強度と、レーザー 光形状変化a)。透過光強度が、蓄積強度を表す。(図 の下方が光強度)。b)、c)は生業開始直後と、時間 がった後の透過光の形状を示している。

2.2 共振器におけるレーザー強度収支測定

前項で述べたように、共振器の鏡における損失が懸 念される。その状況を正確に把握するために、共振器 に入射したレーザー光の強度や透過光強度を測定し、 その強度収支を測定した。図5はその測定結果である。

まず、入射鏡 M1 によって反射されるレーザー強度を、 共振器が共鳴している場合と共鳴していない場合で測 定した。結果は共鳴状態で 5.6 W、共鳴していない状態 で (6.6 W) である。これから、共振器に入射されるレ ーザー光強度の割合、即ち結合係数を (6.6-5.4) /6.6 ~ 0.18 と見積ることができる。M1 直前のレーザー光強度 の測定値は 7 W だったので、結合係数を考慮すると、



図5:共振器に入射したレーザー強度の収支。共 鳴状態、非共鳴状態のレーザー光強度を測定して いる。

共振器に入射されたレーザー強度は 7 W×0.18 = 1.3 W だったことが分かる。一方、鏡 M2 からの透過光強度は 130 mW である。また M2 の透過率は別途 8 × 10⁵ と測定されている。したがって、共振器に蓄積されたレーザー光強度は 0.13 W/8 × 10⁵ ~ 1.6 kW であり、強度増大率は 1600/1.3 ~ 1200 となる。鏡 M2、M3、M4 からの透過光はそれぞれ 0.13 W、0.14 W、0.11 W であった、その合計は 0.4 W となる。前述のように共振器入射される強度は 1.3 W なので差し引き 0.9 W の損失がある。この損失が鏡によるものだと過程するとその損失率は 0.9/4/1600 ~ 100 ppm であり、鏡の熱膨張から推定された値と矛盾ない値となる。

共振器に使用した鏡は REO 社によるものであり、その仕様によると強度損失は 10 ppm であり、実測値は それよりもかなり大きい。その原因として、実験中における鏡の取り扱いに問題があり、鏡表面を汚染した ことが考えられる。今後より高い反射率の鏡を利用する際にはクリーンブースの利用など注意深い取り扱い が必要である。

2.3 レーザー電子散乱によるガンマ線生成

KEK-ATF の 1.3 GeV 電子線とレー ザー蓄積共振器によるガンマ線生成実 験を行った。図 6 (左) は、電子線に 対してレーザー光の垂直方向の位置を 変化させた時のガンマ線量である。こ の幅は、電子線とレーザーの垂直方向 の大きさを反映している。測定された 幅は 16.8 μ m (σ) である。このとき ATF の運転時のパラメータから、電 子線の垂直方向の大きさは 10 ± 1 μ m であることが分かっている。したがっ て、レーザー光の垂直方向の大きさは



図 6: 左) ガンマ線生成量と、レーザーパルスー電子線の垂直相 対位置の関係。右) 透過光の形状から計算されたレーザー電子相 互作用点におけるレーザーの形状

13 μm と推定される。一方、透過光の形状から、共振器内のレーザー光は楕円形をしていると考えられる。 ガンマ線測定からはその垂直方向のみ測定できる。一方、透過光の形状とその測定位置は分かっているので、 共振器内におけるレーザー光の伝搬から、レーザーと電子が交差する位置におけるレーザー光の形状を計算 することが可能である。図6(右)は計算によって求めたレーザー光の形状である。これから計算される垂 直方向のレーザー光の広がりは約16 μm となる。実測値と計算値は概ねあっているが、現在定量的な比較を 行っている。

図7はATFが5バンチ運転の際に取得した生成ガンマ線のエネルギー分布である。観測されたエネルギー

の平均は 2970 MeV となった。ガンマ線1 個あたりの 平均エネルギー 24 MeV から、5 バンチの電子線とレー ザーの交差によって平均 124 個のガンマ線が生成され たことになる。この数は ATF 加速器のパラメータ、レ ーザー光の形状や強度を入力とした数値計算の値(123 個)と矛盾の無い値である。また ATF 加速器における 電子線の周回を考慮すると、1 秒あたり 2.7 × 10⁸ 個の ガンマ線が生成されたことに相当する。



図7:5バンチの電子線とレーザーパルスの 衝突によって生成さらたガンマ線のエネルギ 一分布

2.4 共振器のデジタル制御

レーザー共振器の制御における、将来的な発展や複数のパラメータの同時制御、パラメータの変更に対す る柔軟性を考えるとデジタルシステムによる制御構成の構築は重要である。本事業では、レーザー共振器の 製作とそれによる光子生成の実証と平行して、デジタル制御システムの開発を行ってきた。FPGA を搭載し たアナログーデジタルーデジタルーアナログボード(AD-DA ボード、4DSP 社 FM485)を用いた制御シス テムを前述のレーザー共振器に導入し、共振器制御およびガンマ線生成実験をおこなった。図8に、デジタ ル制御の構成図とそれを用いた場合に共振器内に蓄積されたレーザーの強度を示す。直線偏光レーザーを 入射した場合の平均強度は1.7 kW であった。共振器内に入射されたレーザーの強度を別途測定したところ、 1.47 W であり、アナログ制御の際に測定された増大率 1200 と矛盾のない値である。この状態で、電子線と レーザーパルスのタイミング同期を行い、6 ps の精度で同期できることを確認した。図9は1バンチの電子 線とレーザーパルスの衝突時にえられた、ガンマ線のエネルギー分布である。観測された平均エネルギー 1201 MeV は平均光子数 50 個の生成に相当している。



図8:デジタル制御の構成図(左)とその制御に よるレーザー蓄積エネルギーの分布(右)



図9:デジタル制御方式によって行われたレーザ ー電子散乱実験によってえられた、ガンマ線のエ ネルギー分布

3. プロジェクトのまとめ

本事業では、3次元4鏡共振器によるレーザー蓄積と強度の増強と、それによる光子生成技術の開発を目 的とした。本事業の初年度において、3次元共振器の偏光特性を利用した新しい共振器制御方法を見いだし たことは、大きな成果だった。またそれを我々自身の制作した共振器に導入し実証することができた。

本事業の目指したもう一つの観点は、加速器と高精度光学技術の共存を示すことであった。一般に加速器 の環境は、光学技術開発を行うようなクリーンルームではなく、光学系の精密制御は自明ではない。また、 加速器の運転には、通常の光学環境とは全くことなる超高真空を保つことが必要であり、光学機器の導入は それを阻害する可能もある。実環境における加速器と光学機器の共存を実証することは重要な課題である。 結果として、4 鏡共振器を KEK-ATF 加速器に設置し、加速器の電子線とレーザーを同期した状態で共振器 の周長を4 pm、レーザーパルスと電子線のタイミング同期 6 ps を同時に達成し、ガンマ線生成を立証した。 最終年度においては共振器の動作状態を定量的且つ系統的に調査し、その動作を理解できたことは今後の進 展という意味で大きな意義があると考えられる。

一方、将来の発展と汎用性を見据えて開発を進めたデジタル制御システムは、全く初めての取り組みだっ たこともあり開発に時間を要したが、最終年度にそれを用いた共振器制御とガンマ線生成を実証するに至っ た。実用的には満足な性能とまでは行かないが、最初のステップに到達した。アナログ技術と比べ、原理的 に拡張性が高いデジタル制御技術は、実用化というという観点で非常に重要であり、その基礎技術を得たこ とは大きい。

以上、本事業においては、レーザー蓄積共振器と加速器の電子ビームの組み合わせ技術に関して、実情に 即した技術と経験の蓄積に重点をおいて開発研究を行って来た。その目的にそった成果をあげることができ たと考えている。またそれだけでなく、共振器制御に関して新しい技術を開発しその実証もできたことは特 筆に値する。

開発スタッフ 責任者:高橋徹(広島大学) 担当者:吉玉仁(広島大学)

E. パルス超伝導加速空洞技術の開発 Development of superconducting cavity for pulsed operation

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および実際に電子ビーム加速を行い、それを利用した X 線源の実証を進 めている。本計画では、1.3 GHz 9 セル超伝導空洞 2 台からなるクライオモジュールと電子銃、ビームライ ンを完成させて「STF 加速器」を構成し、平成 24 年度に高電界運転とビーム加速運転を行い、高輝度 X 線 を生成する事を目指して開発を行った。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高電界を出すものである。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の開発研究のため、 HOM ダンパー付 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、クライオ モジュールに空洞を装着しての高電界試験、ビーム加速試験を行なっている。平成 24 年度の最も重要な成 果は、HOM ダンパー付 9 セル加速空洞 2 台を横型クライオスタット (クライオモジュール) に装着してビ ームラインに設置し、低エミッタンスビーム生成用のフォトカソード RF 電子銃をその上流に設置し、小型 高輝度 X 線源用ビームラインと4 ミラー・レーザー蓄積器をその下流に設置して、低エミッタンス電子ビー ム生成、加速、収束を行い、蓄積されたレーザーとの衝突により X 線生成を行う試験を行った事である。

1. STF 加速器の建設

STF 加速器の加速器トンネルへの本格的設置は 2011 年から行われた。9 セル超伝導加速空洞2 台を横型ク ライオスタット(クライオモジュール)に装着して(図1の写真参照)ビームラインに設置し、低エミッタ ンスビーム生成用のフォトカソード RF 電子銃をその上流に設置し、小型高フラックスX線源用収束ビーム ラインをその下流に設置した。ビーム加速に使用する超伝導加速空洞において高い加速勾配を得るために重 要な事は、空洞セルに使用するニオブ材の純度や RF 場がかかる空洞内面の平滑度と清浄度である。本開発 では、徹底した電界研磨設備環境の清浄化を行い、電界研磨で空洞内部に残存析出する酸化ニオブ微小粒や イオウ微小粒の除去を行う処理方法を導入し、微小粉塵の混入を最小とするような超純水高圧洗浄の手順を 採用し、引き続くクリーンルーム内での空洞ベーキングにおいてもシール材表面のインジウム溶出が起きな いように工程を改善した結果、本加速器の加速モジュールに使用する2 台の9 セル超伝導加速空洞の性能が それぞれ 40 MV/m、33 MV/m という高電界まで上げる事ができた。この加速モジュールを実験室となる地 下トンネルに設置すると同時に、2 K 冷凍機や DRFS 大電力 RF システムの組み込み、高精度デジタル RF 制 御回路の組み込みを行った。



(a) 超伝導空洞の2連化



(b) ガスリターンパイプへ超伝導空洞を装着

図1:9セル超伝導空洞の横型クライオスタット(クライオモジュール)への装着時の様子

電子ビームを小さく絞りレーザーとの衝突を効率良く行うには、超低エミッタンス電子ビームが必要であ る。これにはフォトカソードを使用した常伝導のLバンド RF 電子銃を使用する。この電子銃によりパルス 運転する9セル超伝導空洞のビーム加速に適した1msトレイン長の大電流の超低エミッタンス電子ビーム を生成する事ができる。Cs₂Teフォトカソードは電子銃空洞に背後から挿し込むタイプのモリブデンカソー ドブロックの表面に蒸着される。蒸着チェンバーなどのフォトカソード生成システムは電子銃空洞の背後に コンパクトな設計で配置され、加速器の小型化に十分に配慮している。2007 年から FNAL との共同開発で 電子銃空洞と入力カップラーの製作が開始され、2009 年から 2010 年に電子銃部の光学系の設計と製作、フ オトカソードシステムの設計と製作、STF phase-2 用レーザーの設計と製作、そして 2011 年に量子ビーム用 レーザーの設計と製作が行われた。この間に、電子銃空洞の RF プロセスと暗電流抑制の研究が行われ、現 在も継続的に追求されている。生成する電子ビームと直接関係する量子ビーム用レーザーは 162.5 MHz の繰 り返しで波長 266 nm、パルス幅 12 ps を持ち、1 ms のトレイン長のバーストを5 Hz の繰り返しで生成できる。 このフォトカソードは運転中に 0.2-0.5% 程度の量子効率を維持できている。



図2:フォトカソード RF 電子銃を含むビーム入射部の構成図。左端がフォトカソードブロックに Cs₂Te 蒸 着を行う設備で、次に RF 電子銃空洞、入力カップラー、そしてシケーンマグネットと続き、右端が超伝導 加速空洞が装着されているクライオモジュールの端版である。



図3:フォトカソード RF 電子銃全体写真とフォトカソードブロックの写真



図 4: STF 加速器の全体像イラスト: 左からフォトカソード RF 電子銃、超伝導高周波加速装置、ビーム収 束光学系、短パルス大強度レーザー蓄積装置で構成されている。





図 5:実際の STF 加速器の写真。左の写真:手前左下端が RF 電子銃で、中央に9セル超伝導加速空洞2台 を内包するクライオモジュール、その右側に RF パワーを供給する 800 kW クライストロンが見えている。 右の写真:クライオモジュールの下流側のビームラインで、レーザーとの衝突点は奥側の左から右に折れ曲 がった頂点の場所に位置する。



図 6:STF 加速器の全体構成図。電子ビームは左端 RFgun 部分で生成され、9 セル超伝導加速空洞を内包す るクライオモジュールで右方向に加速される。くの字に曲がったビームラインでレーザーとの衝突点に収束 される。

2. 超伝導加速器運転

電子銃システムは2012年2月から電子ビーム発生を行う総合試験運転を開始した。これは、電子ビーム 入射部各機器が正常に動作している事の確認のためと、ひき続くビーム加速運転のためのビームモニターの 調整、運転ソフトウェアの動作確認のためである。9セル超伝導加速空洞はこの間に温度2Kまでの冷却と 総合調整試験が並行して行われた。2012年2月27日に行った最初の電子ビーム発生は、電子銃へ供給する RFパルス幅を20µsという短パルスにして、レーザーのトレイン長も短く設定して行われた。レーザーを照 射開始しRFの位相をスキャンするだけで35バンチ、200 pC/bunchの強度のビームを難なく取出す事に成功 した。その後、軌道調整と収束調整を施した結果のビームの様子を図7に示す。その後の各種の調整作業の後、 2012年3月22日のRF電子銃試験において、RF電子銃空洞に供給するRF振幅と位相にデジタルフィード バックをかけ安定化する事に成功し、さらに照射レーザーを調整する事によりビーム強度がほぼフラットな 1 msトレイン長のビームを取り出す事に成功した。図8のオシロスコープの写真には、その時のビーム位置 モニター(MB01)の電極1と電極3の合成信号波形(青のトレース)を示す。なお、紫のトレースはレー ザーへの切り出しゲート信号である。ビーム強度は、30~40 pC/bunchで、設定バンチ数は162450バンチである。 RF入力パワーは2.6 MW で、37.5 MV/mのカソード電場に相当する。



図 7:20 µs の RF パルス幅で、35 バンチの電子ビーム発生試験の様子。空洞に入る RF 波形(黄)と反射波形(紫) (左)、取り出されたビームのプロファイル(中央)、ビーム位置モニター信号(ブルー)でみる電子ビーム と積分型電流モニターの波形(紫)(右)。



図8:設計の1msビームトレイン長でビーム取り出した時の様子。青のトレースがビーム位置モニターの波形信号で、紫のトレースはRF電子銃レーザーへ供給しているレーザー切出し信号波形

2012年4月12日には、9セル加速空洞の調整作業が完了し、RF電子銃と9セル超伝導加速空洞とを合わ せてビーム加速を行う総合運転が開始された。引き続く4月13日(金曜日)15:31には加速された電子ビー ムをビームダンプまで輸送することに成功した。図9の左側のオシロスコープには、電子銃直後のビーム位 置モニターの信号波形(ブルー)とクライオモジュール下流のウォールカレントモニターによるビームバン チ波形(紫)、クライオモジュール下流のビームラインに沿って張られたオプティカルファイバービームロ スモニター波形(グリーン)、が見えている。図9の右側のスクリーンモニター画像はコンプトンチェンバ ー内の衝突点でのビームプロファイルが見えていて、FWHMで1mmという大きさであった。その時のビー ム位置モニターのオンライン表示では、チェンバー内中央から+/-2.5mm程度の偏差の軌道である事がわか っている。なお、使用したオプティクスは衝突オプティクスではなく、衝突点での絞りを緩くしたビームコ ミッショニング用オプティクスであった。加速されたビームは、エネルギーが40 MeV、ビームチャージが 41 pC/bunchで総バンチ数28 バンチ、繰り返しが5 Hz であり、電子銃の運転パラメーターは、入力 RF パワ ーが2.2 MW (34.6 MV/m カソード電界相当)、取り出された電子ビームエネルギーは3.3 MeV/c で、この時 の9 セル超伝導空洞の加速電界設定値は、MHI-012 空洞が20.15 MV/m、MHI-013 空洞が21.5 MV/m であった。





図 9:40 MeV までビーム加速し、下流のビームラインを通した時の様子。左図の青のトレースがビーム位 置モニターの波形信号で、紫のトレースはクライオモジュール下流のウォールカレントモニターによるビー ムバンチ波形、緑のトレースはクライオモジュール下流のビームラインに沿って張られたオプティカルファ イバービームロスモニター波形です。右図は、コンプトンチェンバー内の衝突予定点でのビームのプロファ イル像です。

この超伝導リニアックは、低エミッタンス電子ビーム生成で実績のある L-band フォトカソード RF 電子銃 と、40 MV/m という高電界を達成した9 セル超伝導加速空洞をクライオモジュール(加速モジュール)に組 み込んで、大電流加速とビーム収束を行う小型な加速器という特徴を持つ。その大電流でかつ極小ビームサ イズは逆コンプトン散乱による高フラックス X 線源に必要不可欠な性能である。2012 年 4 月のビームコミ ッショニングの後、7 月までの3ヶ月の間、大電流ビーム加速を行うための加速器調整が行われた。この間 に行われた開発は以下のとおりである。まず、RF 電子銃空洞への RF パワーの安定化にはデジタルフィー ドバックが適用され、その安定運転のための制御パラメーターの最適化が図られた。そして、RF 電子銃の フォトカソードに入射するレーザーの入射 RF 位相に対する安定化、1 ms に渡る強度フラット化も時間をか けて最適化が図られた。引き続く加速を行う超伝導加速空洞の RF 振幅と位相の安定化もデジタルフィード バック技術の最適化が図られた。その途中結果を図 10 に示すが、1 ms トレイン長にわたる電子ビームを RF 電子銃から取り出し、超伝導加速空洞により 40 MeV まで加速できた。バンチ電荷は 15 pC であり、バンチ が全部で 162448 バンチあるので、総電荷数は、2437nC と大電流である。その後、加速器からのビームロス による放射線漏洩が計測され、漏洩が基準値を満たすように、ビームパイプチャンバーの改造や放射線シー ルドの増強、漏洩箇所の同定と対処など、さまざまな対処が講じられた。その結果、このような大電流加速 器の運転が可能となった。



図 10:1 ms ビーム加速(15 pC/bunch)の時のスコープ写真。RF 電子銃と超伝導加速空洞の RF feedback がかけられて、ビームエネルギーは 40 MeV である。(2012 年 6 月 8 日のデータ)一番下のブルーのトレースがビーム位置モニター信号による RF 電子銃からのビーム強度を表し、グリーンのトレースが加速している間のビームロスを表す。比較的フラット強度のビームが加速されていて、ビームロスもそれほど大きくなく均一であったことがわかる。。

3. X 線生成試験

3.1 レーザー蓄積器

電子ビームとヘッドオン衝突でX線を生成するレーザー蓄積器は4つの高反射率のミラーから構成され ている。それらのミラーの内、2枚は平面ミラー(やや円筒形状になるように歪がかけられている)であり、 2枚は凹面ミラーである。内部の共振器長(ミラー間隔)は、ちょうど 162.5 MHz で発振され入射されるレ ーザー(波長 1064 nm、パルス幅 10 ps)を蓄積できるような共振条件を満たす長さに nm 以下の精度で設置 する必要がある。このため、4 つのミラーは高精度に調整できるムーバーにマウントされ、内部が真空に保 たれなければならないので、大気圧の影響を受けずに微調整ができるようにミラーの前後はベローズチェン バーで力がかからない構造となっている。衝突点にはワイヤースキャナー、スクリーンモニターが配置され、 衝突ビームサイズがモニターできるようになっている。レーザーウエストサイズを測るために共振器からの 発散光をモニターしたいが、取り出されるポート直下にはQマグネットが設置されているので、モニターで きていない。現状では、ワイヤースキャナーのワイヤー通過でレーザー共振がなくなるので、蓄積レーザー のテールサイズを計測することで評価している。レーザーウェストの計測値は、現状では 80 µm であり、さ らなる最適化が必要な状況である。レーザー蓄積器の共振の維持にはピエゾ素子によるミラー位置調整によ りフィードバックをかけて行っている。レーザー蓄積器に蓄積されているレーザーパワーをビームが通過す るタイミングで増強するためにバーストアンプを使って約1msにわたってパワー増幅を行っている。その 結果、10 μJ/pulse のパワーが蓄積されていると期待できるが、残された問題は、バーストアンプ使用時にフ ィードバック用誤差信号が撹乱されてしまい、共振を維持するフィードバックを維持できない事である。こ のことから効率よくレーザーを蓄積器に蓄積できていないが、直前までのフィードバック制御信号をそのま まホールドさせる事によりミラー位置をバーストアンプがかかる直前の状態で維持する方法で、レーザーパ ワー蓄積の改善を行っている。





図 11: 逆コンプトン散乱用レーザー蓄積器の概念図と実際の装置の写真。4 つのミラーで構成される蓄積器 のなかに、2 つの偏向電磁石によって電子ビームが導入され、レーザーとのヘッドオン逆コンプトン散乱を するように設計されている。

3.2 ビーム調整

ビーム調整は、RF 電子銃よりいかに低エミッタンスビームを引き出し、そのエミッタンスを損失なく加速し、下流のビーム収束光学系によりロスなく衝突点でビームを絞るか、に焦点をあてた調整を行った。ビーム性能は、ほぼ RF 電子銃の性能で決まってしまうので、その調整は RF 電子銃用レーザーの安定化、レーザーサイズの最適化、入射カソード位置の最適化から始まり、入射 RF 位相の最適化、エミッタンス補正のためのソレノイド強度の最適化、シケーン通過後のエミッタンス補正のための4極マグネット強度の最適化、そして、ビーム軌道、エネルギー設定、エネルギー幅設定、ビームロス低減などの通常の加速器の調整項目を何度かのアイテレーションにより最適化調整していく。

X線生成のためのビーム調整の結果を図12と図13に示す。図12にはエミッタンス計測の結果を示したが、 目標値は 1mm.mrad 以下であり、それに対し遜色ないレベルまで低く調整できている事がわかる。エミッタ ンスを下げる事ができると、ビーム収束の結果小さいビームサイズが実現でき、レーザーとの衝突確率をあ げることができる。図13に示した、衝突点でのビームサイズは36 μm 程度あり、計測されたエミッタンス から期待できるビームサイズと矛盾はない。



図 12:X 方向とY 方向のエミッタンス測定結果。RF 電子銃からのビームを 40 MeV まで超伝導加速空洞に より加速し、その後、Q マグネットの電流値を変えながらワイヤースキャナーを使用してビームサイズを計 測し、エミッタンスを求めた。X 方向正規化エミッタンスは、1.35 mm.mrad であり、Y 方向正規化エミッタ ンスは、0.79 mm.mrad と、低エミッタンス電子ビームである事が確認された。



図 13: 逆コンプトン散乱用レーザー蓄積器のレーザーと電子ビームとの逆コンプトン散乱をするように設計されている場所に装備されたワイヤースキャナーにより、衝突点のビームサイズが計測される。収束された電子ビームの典型的なサイズは、X 方向は 36 µm、Y 方向は 36 µm であった。

3.3 X 線生成

X線生成試験は、2012年11月から12月にかけて第1回目の試験が行われ、2013年3月に第2回目の試 験が行われた。X線検出器は、MCPを使用したもの、SOIを使用したものの2種類が、衝突点の下流側に 配置された。検出器は、ビームバックグランドを低減するように放射線シールド(鉛ブロック)を施してあ る。MCP検出器は加速器側データ取得システムと同期して信号が取れるようにビームゲート信号とチャー ジADCとの組み合わせで組み込まれている。SOI検出器は、加速器側から同期タイミング情報を配る事で、 SOIデータ取得システム側で同期をとるようにしてある。レーザー蓄積器のレーザー位相と加速器ビーム位 相は、意図的にそれらの周波数はずらされてあり、データ取得タイミングが0から360度の位相のすべてを なめられるようにしてある。ビーム通過に同期したデータ取得タイミングが0から360度の位相のすべてを なめられるようにしてある。ビーム通過に同期したデータ取得な、レーザー蓄積器に溜まったレーザー強度、 その時のビーム強度、X線強度、位相ずれの情報を一括して取れるように構成してある。レーザー蓄積がき ちんと起こり、ビーム強度が強い時の、位相とX線信号とをプロットすれば、どの位相で衝突が起きている かを同定できるはずである。残念ながら1回目の試験では、X線信号がエンハンスする位相は見つける事が できなかった。すなわち、X線生成を見つける事ができなかった。もし見つける事ができるとすると、図14 に示すようなX線スペクトルで、MCP検出器位置で、0.65個/バンチの収量が期待でき、1000バンチ/ト レインで実験したので、650個/トレインの信号が出るはずである。MCP検出器では1フォトンが10ADU (ADC unit) なので、6500ADUの信号エンハンスが得られるはずである。

2012 年 12 月に行われた実験結果を図 15 に示したが、どの位相ビンにもエンハンスが見られず、X 線は生成できていない、もしくはノイズに埋もれているものと考えられる。また、SOI 検出器よる生成試験においても、X 線エネルギースペクトラムにエンハンスが見られなかった。



図 14:本試験で見つかるであろう生成 X 線のスペクトル。28 KeV にピークを持つ。低いエネルギーの X 線 が失われているのは、X 線がミラーを通過する時にロスするためである。



図 15:生成 X 線の適正位相をみつけるための位相スキャンのプロット。赤いプロットは MCP 検出器からの 信号強度。青いヒストグラムは、その時のビンにはいったデータ量を 10 倍して示してある。X 線にエンハ ンスが見られていないので、X 線が生成できていないと考えられる。

2012年12月のX線生成試験において、X線が生成できていない原因について、各種の考察がなされた。(1) レーザー蓄積器ミラーの機械的振動により安定にレーザーを蓄積できていない可能性。(2) RF 電子銃レー ザーに位相ドリフトがみられ電子ビーム軌道が不安定で衝突位置がふらついた可能性。

これらの原因を追求し、2013 年 1 月から 2 月にそれらの対策を行った。レーザー蓄積器は、図 16 に示す ようにミラー同士の機械的振動による揺れを抑制するために、差し渡しのステンレス製のビーム板を用いて、 マイクロメーターヘッドによりミラーホルダーを機械的に固定した。また、光学テーブルも補強板を差し渡 したりして床からの振動が光学系に伝わりにくいような対策を施した。さらに、電子銃からのビーム軌道を 安定化させるために、RF 電子銃用レーザーには、0.01℃で精密温度調整できる空調機を導入し、さらに位相 安定化回路も外付し、衝突点の電子ビーム軌道ドリフトを低減させた。2013年3月の実験では、これらの 改善の結果、図17と図18に示すようにX線生成が確認できた。この時の実験条件は、

電子ビーム: エネルギー 40MeV、248 バンチトレイン、強度 55pC/ バンチ、

衝突点ビームサイズ X 方向 43 µm、Y 方向 55 µm

レーザービーム: 衝突点でのエネルギー 約15.4 µJ、レーザーサイズ 約80 µm、

であった。この条件での X 線生成期待値(計算値)は、約 10 photons/bunch であり、1 ms トレイン長で 5 Hz の正規ビーム運転では 8 × 10⁶ photons/sec の生成率である。これは、目標の 1.3×10^{10} に比べて、約 1/1600 の強度である。図 19 に示すように、MCP 検出器による生成信号をガウスフィットし、生成量を計算す ると MCP 検出器口径に入ってきた X 線量は 248 バンチ /train のビームに対し、451 photons/train となり、 1.8 photons/bunch の生成量であった。これは、正規ビーム運転では 1.5×10^6 photons/sec に相当する量であり、 期待値と大きな矛盾はない。この実験値を用いると、目標値の 1/8700 の生成強度であった事になる。



図 16: 逆コンプトン散乱用レーザー蓄積器のミラーの機械的振動に対する対策の写真。4 つのミラーで構成 される蓄積器のなかに、差し渡しのステンレスビーム構造材が導入され、4 つのミラーホルダーを互いに固 定するように設計されている。



図 17: MCP 検出器による X 線信号位相スキャンの結果。プロットは、Laser power が 70000 ADC カウント 以上をレーザー ON と定義、2000 ADC カウント以下をレーザー OFF と定義し、レーザー ON 時の MCP 信 号から、レーザー OFF 時の MCP 信号を差し引いてある。さらにビーム電流強度のふらつきを排除するため にICT (ビーム強度検出器信号) により正規化してある。



図 18:SOI 検出器による生成された X 線のエネルギースペクトラムの測定。X 線信号のピークは約 28 keV と測定され、期待値どおりである。



図 19:SX 線生成量の見積もり。MCP 検出器による生成信号をガウスフィットし、生成量を計算すると MCP 口径に入ってきた X 線量は 248 バンチ /train のビームに対し、451 photons/train となり、1.8 photons/bunch の生成量であった。

4. 成果のまとめ

「パルス超伝導加速技術の開発」班では、本事業を通して、パルス超伝導加速空洞の性能向上の開発を行い、 大強度電子ビーム加速器に組み込んで高電界でビーム加速運転をする事ができ、高輝度光子ビームの生成試 験の段階まで進める事ができた。超伝導加速空洞の加速電界は、ニオブ材料自身の限界からくる加速限界に 近い、40 MV/m という高い加速電界を達成する事ができた。これには、空洞製造時の表面欠陥の問題の克服、 空洞内面の表面処理時の残留物質除去の開発、空洞内部汚染のないような清浄環境の確保など、多大な努力 が払われた結果である。

このような高性能超伝導加速空洞を加速器に組み込むための加速モジュール建設においても、清浄度確保 と熱負荷低減の努力が必要であり、製造設置された加速モジュール(クライオモジュール)は、所期の性能 を満たしている。これも本開発の成果である。

高輝度光子ビーム実現のためには、大電流加速器の実現と大強度光子蓄積器の開発がキーポイントである。 大電流加速器の実現のために、RF電子銃から低エミッタンス大電流ビームの取り出しが必要であり、本開 発もそこにかなりの労力が注入された。低暗電流と高加速勾配のフォトカソードの実現、デジタルフィード バックによる空洞 RF 振幅と位相の超安定化、照射レーザーの超安定化、などがその開発項目である。超伝 導加速空洞の高安定運転も同様である。

もっとも難しい技術である大間隔4ミラー蓄積器の超伝導加速器への組み込みは、いまだその途上にある が、機械的振動の克服と安定フィードバックによるレーザー蓄積維持にある程度のところまで開発が進み、 X線生成を確認できるところまで成果が上がっている。もう少しの工夫で、安定蓄積が可能となり、期待通 りのX線生成が可能となるところである。

5. 開発スタッフ

責任者:早野仁司(高エネルギー加速器研究機構)

担当者:野口修一、加古永治、佐伯学行、山本康史、渡邊謙、宍戸寿郎、佐藤昌史、杉山陽栄、加藤茂樹、 沢辺元明、文珠四郎秀昭、福田茂樹、設楽哲男、明本光生、中島啓光、片桐広明、矢野喜治、竹中 たてる、道園真一郎、松本利広、松下英樹、土屋清澄、近藤良也、細山謙二、仲井浩孝、小島裕二、 本間輝也、原和文、中西功太、浦川順治、久保淨、照沼信浩、黒田茂、奥木敏行、内藤孝、両角祐 一、大森恒彦、田内利明、山中将、東保夫、安島泰雄、渡邊勇一、久保毅幸、清水洋孝、福田将史、 本田洋介、荒木栄、Alex Arishev、幅淳二、三好敏善、山本明、山口誠哉、横谷馨、峠暢一 (以上 高エネルギー加速器研究機構) 倉本綾佳、Mathieu Omet (以上 総合研究大学院大学) 栗木雅夫、飯島北斗、(以上 広島大学) 坂上和之(以上 早稲田大学)

柏木茂(以上 東北大学)

岩下芳久、頓宮拓(以上 京都大学)

磯山悟朗、加藤龍好、川瀬啓悟(以上 大阪大学)

F. CW 超伝導加速空洞技術の開発 Development of Superconducting Accelerating Cavity for CW Operation

概要

本課題は小型 X 線発生装置の光源となる電子の加速に連続 (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 運転が可能な超伝導空洞 本体とともに高周波電力源、高周波電力を極低温空洞へ伝送する入力結合器などの周辺要素開発が不可欠で あり、それらの開発と性能試験を行って来た。またそれらを収納して冷却するためのクライオスタットや冷 却配管の設計製作も平行して進められた。本年度は本課題研究の最終年度としてそれらの構成要素の全体的 な組立を行い、ヘリウム冷凍機により 2K への冷却試験に成功した。続いて行われた性能試験でも 14 MV/m の CW 加速電場を確認し、空洞自身の電力損失や電圧限界の原因、投入電力、周波数安定度など電子加速に 必要な基本性能を得ることが出来た。

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が、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 可能な装置開発が進められている。本研究課題では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)を考え、それに必要な超伝導加速空洞を開発した。昨年度までに達成した ことは、CWビーム対応型高電界超伝導空洞本体の形状最適化と試作機製作、性能評価試験およびその結果 を踏まえた実機空洞の製作、ならびに主要部品である入力結合器の設計と製作、大電力高周波源開発、そし て高調波減衰器の製作とこれらを集約するCW空洞モジュール用クライオスタットの設計製作である。本研 究の最終年度である本年度は、これら構成要素の総合組立をした上でヘリウム冷却系へ接続し、実際に冷却 して高周波電力を投入するまでの総合性能試験を実施した。

2. CW 方式の構成と基幹技術

高電界型超伝導空洞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、電力や冷却の制限からパルス運転になるために平均電流値が小さく抑えられてしまう。一方、CW運転ではピーク電流値は小さくても平均電流が大きくなるため、発生する放射光の輝度にも飛躍的な向上が期待できる。図1にそのシステムの1例を示す。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さらに22MVの主空洞で加速する。これにより25MeVの電子ビームが得られるが、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てビームの運動エネルギーを回収・再利用することで、エネルギー効率を上げるとともに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のが2種類のCW型の超伝導主加速空洞であり、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3MV入射空洞が、また主加速部にはCWの高加速電圧を供給する22MV加速空洞である。本課題では1.3 GHzの超伝導空洞を用いた100mAの平均電流の加速を想定しているが、この大きな平均電流が空洞内に励起する有害高調波を十分に減衰して安定なビームを得ることの出来る2種類の1.3 GHz超伝導空洞とその周辺部品を格納するクライオスタットを開発する。



図1:CW型高輝度光子ビーム源の構成

3. CW 型 22 MV 超伝導空洞モジュール開発

CW型 22 MV 超伝導空洞モジュールの開発では昨年度までに、CW ビーム対応型高電界超伝導空洞本体の 製作と性能評価試験、主要部品である入力結合器の製作と電力試験、周波数チューナーの製作と駆動試験、 高調波減衰器の製作などを進めてきた。またこれらを集約する CW 空洞モジュール用クライオスタットの設 計と製作も行って来た。そこで本研究の最終年度である本年度ではこれら構成要素の総合組立を行い、ヘリ ウム冷却系や高周波電力系を接続して総合性能を実施した。以下に開発したモジュール構造を解説する。

3.1 22 W 超伝導空洞モジュールの構成

加速空洞の運転周波数は本研究機構がリニアコライダー開発で蓄積した超伝導空洞技術を利用するため 1.3 GHz とし運転温度は 2K である。クライオスタット内部の構造を図 2 に示す。リニアコライダー用途な どのパルス駆動型の超伝導空洞では 1 台当たりの 2K への RF 損失が 1 W 程度であるのに比して、CW 型空 洞の場合は 12 MV/m の時でも 16 W になる。このため大きな冷却能力が必要である。本モジュールの基本 設計では空洞 1 台当たりの高周波損失を最大 20 MV/m、40 W とした。直径 300 mm のヘリウムジャケット に収納された 9 連空洞 2 台は熱膨張率が近いチタン製の枠構造に固定された上で、高調波減衰器を間に挟ん で接続される。空洞のアライメントはこのチタン枠を用いて行われる。高調波減衰器は想定される熱負荷 が 100 mA ビームでは 100 W を超えるため液体窒素で冷却する必要があり、隣接する 2K の空洞との間の熱 絶縁が重要になる。本モジュールではクシ歯型ベローズを採用した。同軸アンテナ型の高周波入力結合器は 中央側ビームパイプから水平方向に突き出している。これらの空洞本体、高調波減衰器、入力結合器、ビー ムパイプなどはクラス 10 のクリーンルーム内で接続されバックボーンと呼ばれる枠構造に固定された上で、 そのままクライオスタットに装着される。周波数チューナーや磁気シールドはその後に組み込まれた。



図2:試作した CW 型超伝導空洞モジュールの内部構造。9 セル型超伝導空洞(赤)が2 台収納されている。 別々のヘリウムジャケット(青)に収納された2 台の空洞は磁気シールドを兼ねた5K シールド(薄紫)に 囲われ、さらに窒素シールド(橙)で覆われている。空洞および5K シールドはバックボーンと呼ばれる室 温の枠構造(灰)で支えられている。

3.29セル超伝導空洞

CW 型空洞として最適化された 1.3 GHz ニオブ空洞形状を図 3 に示す。大電流ビームがもたらす有害高調 波への対策として空洞両端には大口径ビームパイプを持ち、さらに EFB と命名された偏心型モード変換部 を取付けることでこれまでにない 4 極モード対策を有する 9 連型空洞形状であり、高輝度ビーム源として必 須の大電流対応型を実現している。この大口径ビームパイプの問題としてアイリス部での電場の集中とそ れに伴う電子放出の影響が挙げられるが、空洞単体での性能試験では 28 MV/m の加速電場を達成しており、 この空洞形状とその製作法には問題がないことが示されている。

図4は製作された実機空洞である。これまでの試験空洞の製作とその性能試験を通じて獲得した技術の上 に製作された。空洞強度を高めるために空洞セル間には補強リングが装着されており、強度計算により求め た最適板厚を採用することで、実用運転に必要な機械強度を確保している。溶接には不純物が混入するおそ れのない電子ビーム溶接を採用した。

この空洞は表面加工層と不純物を除去する目的で電解研磨により 125 μm の研磨をし、その上でニオブ中 に取り込まれている水素分子を除去する目的で 750℃のアニールを4時間行った。その後、9 個の各セルに は加速電場を一様にして加速効率を上げるための周波数調整を行った。周波数調整後には表面の汚れを除去 するために再度 50 μm の電解研磨を施し、さらに大量の超純水を使った高圧水洗(HPR)を 10 時間以上実 施した。その後はオイルフリーの真空雰囲気で排気し 48 時間以上のベーキングを行った。

図5は最終的に得られた各空洞単体の性能を示している。これまで試験結果から28 MV/m 以上で放電を 起こすと空洞性能が劣化することが判っており、この計測では実用電場以上の25 MV/m に達したところで 計測を停止した。電子放出現象は、20 MV/m 以上にわずかに見られたがQ値も1×10¹⁰を有しており実用で きる性能であることが示された。計測後の空洞は室温へ昇温後アルゴンガスを封入した状態でチタン製ヘリ ウムジャケットを溶接し、耐圧気密などの高圧ガス保安に則った各種試験を行った。



図3: CW型9セル超伝導加速空洞形状。セル間のアイリス口径を大きくして結合を強くすることで高調波 が取り出し易くしてある。大きな口径のビームパイプから漏れ出た高調波は空洞の隣に置かれたフェライト 付きビームパイプに吸収・減衰される。



8 1e+010 1e+009 0 5 10 15 20 25 30 Eacc [MV/m]

図4:製作直後の2台のニオブ製9連型空洞。これに電解研磨とアニール、高圧洗浄からなる一 連の表面処理が行われた。

図 5:9 連空洞の性能試験結果。加速電場 25 MV/m までを確認した。電子放出 (FE) は軽微で 20 MV/m 以上でわずかに見られた。

3.3 入力結合器

高周波電力の供給には同軸型アンテナを採用し、低温側と室温側の両方にセラミックディスクを配置した2 重窓構造を有している。東京大学物性研との共同開発によるものである。室温から2Kの超伝導空洞へ20kW のCW電力を供給することができ、かつ全反射に耐える設計になっている。20kWは20MV/mの時の周波 数離調が最大100Hzに対応できる電力である。低温窓は空洞組立作業の最初の段階で高クリーンルーム内 で空洞本体に取り付けることで、その後の組立工程中にゴミが空洞内へ侵入するのを防ぐ目的がある。セラ ミックディスクは自身の高周波損失を小さくするために純度99.7%のアルミナで作られ、表面にはTiNのコ ーティングが施されている。内導体の冷却には室温の窒素ガスが使われ、外導体は5k、80Kの熱アンカー によって熱伝導で冷却される構造である。外導体の発熱を減らす目的で同軸インピーダンスを60Ωをにし てある。最終組立の前には低温テストスタンドでの電力試験で20kWの全反射試験を行った(図6)。



図6:開発された入力結合器(左)と低温ステーションでの電力試験結果(右)

3.4 周波数チューナー

超伝導リニアコライダーのために開発されたスライドジャッキ方式の周波数チューナーをベースに開発された(図7)。空洞全長を変えて周波数を変化させるものであり、3 mmの可変範囲で約800 kHzの加速モード周波数を変える事が出来る。さらに速い周波数応答を可能にするためのピエゾチューナーが併用してあり、その可変範囲は1 kHz である。



図 7:動作試験中のスライドジャッキチューナー(左)とマイクロセンスを用いたバックラッシュの計測結果(右)。バックラッシュは最大でも 0.4 µm に抑えることができた。

3.5 高調波減衰器

9 連空洞両側にはフェライト吸収体を用いた高調波減衰器を接続する。図8 は直径が 123 mm の高調波減 衰器である。中央部には長さ80 mm、厚さ3 mm のフェライト円筒があり、その両側にはフランジへの熱伝 達を防ぐとともにベローズ側へ高調波が侵入するのを防ぐ目的でクシ歯型 RF シールドが付いている。図9 は空洞に取り付けて計測したときの高調波減衰特性であり、フェライト無しの状態(青)がフェライトを付 けることに依って減衰(赤)したことを示している。図 10 には空洞本体、入力結合器、高調波減衰器の接続 状況を示した。





図 8: 高調波減衰器内面の接着されたフェライ ト円筒とその両側にはクシ歯型 RF シールトがが 見える。

図 9: 高調波減衰器の減衰特性。フェライトが ないときの Q 値(青)がフェライトを装着する ことによって減衰した(赤)。



図 10:9 セル空洞はチタン枠の中に固定され、高調波減衰器を挟んで接続される。中央側のビームパイプに は入力結合器が装着され、反対側のビームパイプには周波数チューナーが取り付けられている。

3.6 最終組立工程

これらの構成部品は単体でそれぞれの性能試験を行った後、今夏に全体的な組立が行われた。高電界空洞 へのゴミの混入は放電現象などの原因となるため空洞周辺部、すなわち空洞本体、入力結合器、高調波減衰 器およびそれらを接合するビームダクトは ISO クラス4(クラス 10)のクリーンルームの中で組み立てられ た。図 11 は結合直後の空洞である。



図 11: クリーンルーム内で組み立てられた2台のCW型9セル空洞。空洞はチタン製ヘリウムジャケット 内に収納されている。空洞の両端には内部にフェライト吸収体を装着したクシ歯型ベローズが取り付けられ ている。真空リークテストの後、内部にアルゴンガスが封入された上でクリーンルームから搬出、クライオ スタットへの組込が行われた。

4. 22 MV 加速空洞の冷却試験

上記モジュールの冷却試験が2012年11月から12月にかけて、高エネルギー加速器研究機構内で行われた。 そのときの配置を図12に示す。





図 12: 放射線シールドの中に置かれた CW 空洞モジュールは 500 W 冷凍機に接続され、35 kW 高周波源を 使って 1.3 GHz の高周波電力が供給された。

4.1 冷却試験概要

冷却試験は7週間にわたって行われた。

- ・第1週と第2週:入力結合器の室温エージング
- ・第3週、第4週:モジュール冷却試験
- ・第5週: 高周波制御系の調整と動作試験および高調波モードの調査
- ・第6週、第7週:空洞の性能測定

冷却前に入力結合器の室温エージングを行い結合器のガス放出を行った。クライオモジュールには44個の低温用温度センサーを含む148個の温度モニターが配置されており、それらを見ながら冷却速度を調整した。目標とした冷却速度は3K/時である。クライオスタットは光学系、レーザーなどを用いて空洞の位置が 監視出来るようになっており、冷却中の空洞の動きを追跡することが出来る。冷却完了後は高周波モニター 系の較正から始め、周波数チューナーの駆動試験、高調波モードの調査などを行った。最後に空洞性能測定 を行い、空洞エージングの後、加速電圧の確認、空洞の電力損失の計測、電界放出電子による放射線の計測 などを実施して加速空洞としての基本的な性能を確認した。

4.2 計測まとめ

現在も取得した計測データの解析を進めているがまだ終了しておらず、以下にここまでに判明している性 能を列挙する。

4.2.1 冷却中の空洞の動き

空洞を保持しているチタン製枠構造にはアライメントターゲットが付けてあり、クライオスタットの外か ら光学的に冷却中の空洞の動きを監視することが出来る。図 13 は 2 台の空洞の冷却開始から昇温までの空 洞両端の動きを示している。このデータにチタン枠の熱収縮による補正をすることによって、空洞の中心位 置を推定することができて、その結果からは組立基準位置に対して 0.3 mm 以内の精度で安定に保持出来て いることが判る。これはまたレーザーを使った別のモニターでも検証された。



図 13:全性能試験工程中の空洞位置の動き。空洞を保持するチタン枠に取り付けられたアライメントター ゲットをクライオスタット外から覗いて計測した。ここにはチタン枠の熱収縮が含まれるため、その補正し て空洞中心位置を推定する。その結果、全工程中の空洞の動きは 0.3 mm 以内であることが示された。

4.2.2 周波数とチューナー

冷却中の周波数の変化を図 14 に示す。冷却にともなう熱収縮によって周波数は上昇し、その変化は 2 MHz 程度であった。これに対し図 15 に示すようにモーター駆動の粗調周波数チューナーは十分に広い可動範囲 と小さいヒステリシスがあり共振周波数を運転周波数 1.3 GHz に同調させることができた。粗調チューナー は 2K ヘリウムジャケットに直接取り付けられており、1 m の空洞全長を 2 ~ 2.5 mm 伸ばす事ができる。こ れは 660 kHz の周波数範囲に相当する。


図 14:冷却中の両空洞の周波数変化。周波数変化がニオブの熱収縮率と合致することから、モジュールからの付加的な力が空洞に加わってないと考えられる。



図 15: 粗調周波数チューナーによる空洞長の変化と加速モード周波数の応答(左)と微調用ピエゾチュー ナーへの印加電圧と周波数の応答(右)。粗調チューナーは低温下で2~2.5 mmの駆動長を有し、500 KHz 以上の可変範囲を示した。両空洞ともに十分に広い周波数可変範囲と小さいヒステリシスを示した。微調用 ピエゾチューナーには許容電圧の半分(500V)までの印加試験を行ったが、正常な動作と十分な追随速度を 示した。周波数の可変量は1 kHz であった。

4.2.3 振動試験計測

高周波制御には周波数追跡(PLL)回路があり、この信号でピエゾ微調チューナーを駆動することにより 空洞の共振周波を固定する。この回路を外すと空洞の機械振動を共振周波数の変化として捕らえることが出 来る。図 16 はその信号であり、機械振動としては 34.5 Hz、45.2 Hz、49.3 Hz などの成分が観測されたが周 波数変動幅の最大は 7 Hz であった。これは予想よりも 1 桁小さい値であり、クライオスタットの空洞保持 機能が良好であることを示している。これにより空洞と入力結合器との結合を 1 桁下げることができ、また 必要な高周波電力もキロワット級に下げる可能性が示された。



図 16: PLL 回路を open したときの位相信号。この最大振幅が 7 Hz に相当する。

4.2.4 空洞エージングと加速電圧

2 台の空洞の電力試験は別々に行った。ゆっくりと投入電力を上げながらクライオスタット内やクライ オスタット周囲に配置した PIN ダイオードや NaI を使って放射線を観測した。最大加速電場は 16 MV/m と 16.7 MV/m に到達したが、10 MV/m 付近から電子放出が始まるのが観測され、電界放出電子による強い放射 線の発生と発熱による空洞損失の増加により、安定に運転出来る電界は 14 MV/m 付近に制限された。観測 された 2 台の空洞の加速電場と空洞損失を図 17 にまとめた。空洞の電力損失は図 18 に見られるように、蒸 発するヘリウムガスの流量から求めている。



図 17:9 セル型超伝導加速空洞の Q-E 特性。15 MV/m まで到達したところで放電が発生し、その後は空洞 特性が変わった(左図)。その変化は検出された放射線の分布の変化でも観測され、10 MV/m を超えると空 洞内部に電界放出が発生し、空洞内で加速された電子が壁をたたいて X 線を放出しているものと思われる。



図 18:9 セル空洞の高周波損失計測の例。空洞冷却で消費されたヘリウムのガス流量と温度から空洞での発 熱を計算した。

4.2.5 22 MV 空洞の計測まとめ

以上の計測によって確認された性能を表1にまとめる。空洞の加速性能は電界放出電子による空洞損失に より14 MV/mと14.5 MVに制限された。この2台の空洞を使うことによって本課題の目標である22 MV は 確保されるものの、さらに加速性能を上げるためにはこの電子放出の原因を特定し軽減する手法を開発する 必要がある。入力結合器については20 kW の全反射での使用に問題はないことが判った。周波数チューナー は冷却後も滑らかな動きを維持しており、その機能も要求を満たすものであった。

本空洞のために設計したクライオスタットには2K・50Wの冷凍負荷が要求されるが、本試験では47Wの負荷が実証された。空洞支持機能は良好であり冷却中の空洞アライメントの乱れは0.3mm以内、また機械振動振幅についても加速モード周波数への影響が7Hzと小さく抑えることが出来た。しかし2Kへの熱侵入は11Wあり設計より大きい値である。その熱侵入の経路を温度データの解析から特定する必要がある。

本課題の遂行にあたっては CW 運転に要求される空洞本体やクライオスタットに掛かる大きな負荷に対応 するため、設計や製作にはたくさんのアイデアが考案され工夫が持ちこまれた。今回の良好な結果とともに、 今後のデータ解析を通じて得られるそれらの結果は今後の開発への貴重な足がかりになる。

項目	Cavity A	Cavity B	
(設計値)			
設計周波数	1300	MHz	
R/Q	90	00	
Esp/Eacc	3.0		
(計測値)			
最大加速電場	16 MV/m	16.7 MV/m	
保持試験した電場	14.5 MV/m	14 MV/m	
Q 値 (高電圧)	7.2E+09	5.6E+09	
Q 値 (低電圧)	1.16E+10	1.08E+10	
Static loss	11 watts		
周波数可変範囲(motor)	1299.766 – 1300.345 MHz 1299.759 – 1300.393 MH		
周波数可変範囲 (piezo)	1 kHz	1 kHz	
機械振動成分	34.5 Hz, 45.2 Hz,	49.3 Hz, 98.5 Hz	
入力結合器Q値(可変範囲)	1.5 – 5.3 E+07	0.87 – 3.3 E+07	
最大印加電力 (離調時)	10 kW	15 kW	
モジュール全長	4612 mm		
アライメント数値	空洞中心は 0.3 mm 以内		
真空度	7E-07 Pa		

表1:22 MV 超伝導空洞モジュール性能計測まとめ

5.3 W 入射空洞モジュールの冷却試験

5.1 入射空洞モジュールの構造

3 MV 空洞モジュールは昨年度に組立が終わり、今年度は試験場所への設置と性能試験が 22 MV 空洞の冷却試験に続いて、2013 年 2 月に行われた。図 19 にモジュール内部の構造を示した。





図19:3台の2セル空洞設置構造図と写真

入射空洞に要求される加速電圧は低いがビームへ伝送する高周波電力は大きいため、2本の入力結合器を 装備する2セル型超伝導空洞が3台で構成されている。3 MV・100 mAの加速に対しては300 kWの電力が 必要であり、6本の入力結合器により1本当たりの負担は50 kWに減らすことが出来る。空洞本体について の単体での性能試験では、40 MV/m以上という高い加速電場を得た。これは設計値の15 MV/mを大きく上 回る値である。

5.2 入射空洞モジュールの冷却試験

2本の入力結合器による電力供給で問題になるのは両者の位相差であり、両者の導波管長を調整して空洞 電圧が最大になるところを求めた。図 20 は与えた位相差の空洞電圧に対する効果を示している。



図 20:2本の入力結合器間の位相差の加速電圧への効果

図 21 に空洞エージングの経緯を示す。短パルスによるエージングでは 15 MV/m へ到達しているが(左)、 CW モードにすると冷凍機への熱負荷が増大するため最大電界は 8.1 MV.m へ制限された。CW 運転での Q 値を図 22 に示した。この発熱の原因は計測された温度結果から特定されており、各空洞に取り付けられた 高調波取り出し用コネクターの発熱が原因であった。図 23 は高調波結合器の構造を示している。空洞に励 振された加速電場の一部がこの結合器に到達し、断熱真空層の中にある高周波取り出しコネクターを発熱さ せていると考えられている。この発熱が 2 K 空洞側へ伝達して負荷を増やしている。得られた計測結果は表 2 にまとめた。

大電力対応型の2セル空洞3台を収容した入射空洞モジュールが完成し、その性能評価を行った。入力結合器1本当たりの電力を軽減するために、各空洞には2本の結合器が装着された。この2空洞方式はうまく機能し所定の結合度を確保することができた。2Kへの冷却も順調であり、クライオスタット構造に問題は見られなかった。空洞自体の加速性能は15 MV/mを示したが、高調波結合器のコネクターに発熱が見られ、これが2Kへの熱侵入を増加させている。対処としては熱アンカー構造の変更や発熱したコネクタの材質をサファイアなど熱伝導が高い材質に変えるなどの対策が考えられる。それらの問題があるにしても3 MV入射モジュールとしては機能することが判った。



図 21:空洞エージングの経過。短パルスでのエージング(左)では 15 MV/m へ到達しているが、CW モードにすると冷凍機への負荷が増大し 8.1 MV/m に制限された(右)。



図 22:3 台の入射空洞の性能。高調波取り出しコネクターの発熱により熱負荷が増大したため、Q 値は設計 値に比べて1桁小さい。3 台の空洞の性能が揃っているため、原因はどれも同じと考えられる。



図23:高調波取り出しカプラーの構造(左)と冷却試験中に見られたの温度上昇のデーター(右)

項 目	Cavity 1	Cavity 2	Cavity 3
(設計値)			
設計周波数		1300 MHz	
R/Q		204	
Esp/Eacc	2.25		
運転加速電場	6.5 MV/m	7.5 MV/m	7.5 MV/m
(計測値)			
最大加速電場	15 MV/m 以上	15 MV/m 以上	15 MV/m 以上
保持試験した電場	8 MV/m	8 MV/m	8 MV/m
Q 值(8 MV/m)	1E+09	1E+09	1E+09
Static loss		12 watts	
共振周波数	1299.924 MHz	1299.655 MHz	1299.629 MHz
粗チューナーの周波数応答	1 MHz/mm	1 MHz/mm	1 MHz/mm
Piezo チューナー可変範囲	2 kHz	2 kHz	2 kHz
2本の入力結合器Q値	2.40 & 2.39 E+06	0.95 & 1.20 E+06	0.94 & 1.28 E+06

表2:3 MV入射空洞モジュール性能計測まとめ

6. 成果のまとめ

本研究課題は電子を用いた X 線源の輝度を飛躍的に向上させる手段として、1.3 GHz 超伝導加速空洞を用いた高電界での CW 運転が可能な電子加速装置の技術開発である。その達成目標としては

- (1) 300 kW クライストロンの試作と出力試験
- (2) 3 MV、100 mA 加速を目的とした超伝導空洞の最適化設計と試作
- (3) 22 MV 超伝導加速空洞モジュールの試作と性能試験

であった。(1) については試作クライストロンがすでに電圧 49.5 kV、ビーム電流 9.75 A で 305 kW の出力を 達成しており、その効率も 63% を記録している。本課題に必要な2種類の高周波入力結合器、すなわち3 MV 空洞に必要な 190 kW 級結合器と 22 MV 空洞用 2 重窓式 20 kW 結合器の開発は、このクライストロンを用 いて行われ、さらに3MV入射空洞モジュールの冷却性能試験もこのクライストロンを用いて行われた。(2) の3 MV 入射空洞開発はその設計と試作を終え、2 セル型3 空洞からなる入射空洞モジュールとしてまとめ られた。各空洞には2本の入力結合器が装着され、合計6本の結合器が最大1MWの電力を投入出きる仕様 になっている。テストスタンドで行われた結合器単体の電力試験では、短パルスのエージングに続いて各結 合器に 40 kW の CW 電力が投入された。昨年度に全体的な組立を行い、本年度は総合組立後の入射空洞モ ジュールの冷却試験が実施され8 MV/mの CW 加速電界が確認された。高調波取り出し部に発熱が見られた が、最大 5 MV までのビーム加速ができることが実証された。今後は結合器、空洞ともにそのコンディショ ニングを進め、さらに高い性能の検証をめざす予定である。(3)の22 MV 加速モジュールについては東大 物性研との共同で開発された 20 kW 級入力結合器が低温試験スタンドでその性能を実証した。本年度はこの 結合器とともに KEK で開発した超伝導空洞本体や周波数チューナー、クライオスタットなどを装着した加 速空洞モジュールが完成しその低温試験が行われた。2 K への冷却でもアライメントを失うことなく冷却は 完了し、2 台の空洞はそれぞれ 16 MV、17 MV の加速電場を達成したが強い電子放出が認められまた冷凍機 容量の制限もあり、CW 運転としては 14.2 MV と 13.5 MV に制限された。このため合計の最大電圧は 28 MV である。入力結合器には 15 kW の全反射 CW 電力が印加されその性能が確認された。周波数チューナーに ついても粗調チューナー、微調チューナーともに見込み通りの機能を示し、機械的な振動による空洞の周波 数変動が7Hzと極めて小さかったこともあり、ビーム運転に対しても安定な電圧供給が期待できることが 判った。有害高調波に対しても予想から大きく外れる高調波は認められなかった。

以上のように、本開発研究が目標とした重要な課題は全て達成された。しかし最終性能試験で得られた試 験結果の解析作業はまだ続いており今後も性能試験を継続することによって、より高度化をめざした開発を 進めてゆくつもりである。

開発スタッフ

責任者:古屋貴章(高エネルギー加速器研究機構)

担当者:梅森健成、阪井寛志、佐藤昌史、江並和宏、篠江憲治(高エネルギー加速器研究機構) 沢村勝(原科研)

Enrico Cenni(総合研究大学院大学)

G. X 線検出装置開発 Development of X-ray detectors

概要

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。2012 年度は、これまでに開発した SOI シリコンピクセ ル検出器の評価試験や応用試験を行い、実用化に向けてハードウェアおよびソフトウェアの改良を行った。 また、量子ビーム加速器 X 線発生装置実機、および実証機 LUCX の X 線評価実験を行った。

1. SOI 技術による X 線ピクセルセンサー開発

高精細 X 線イメージング応用への可能性を探るべく、前年度に引き続き SOI 技術に基づくシリコンピク セル検出器の可能性の評価・検証に取り組んだ。今年度は、大面積・高精細・積分型 SOI ピクセルセンサー、 INTPIX4 用ハードウェアおよびソフトウェアアップグレードと、高抵抗基板(FZ-SOI)を用いて製作した INTPIX5 の評価・応用試験を行った。INTPIX4 と INTPIX5 の仕様を表 1 に示す。

	INTPIX4	INTPIX5
チップ面積 [mm ²]	15.5 × 10.3	18.3 × 12.2
画素サイズ [mm ²]	17×17	12×12
画素数	約 43 万画素	約 130 万画素
有効面積 [mm ²]	14.1×8.7	16.9×10.8
アナログ出力数	1または13	1または11

表1:大面積積分型センサーの仕様

A) INTPIX4 用ハードウェアおよびソフトウェアアップグレード

INTPIX4のこれまでの課題として、データ収集速度が遅いという問題があった。データ読み出し時間は 440 ns/pixel なので、1 画像分読み出すのに約 200 ms かかり、さらにデータ転送時に(PC の仕様にもよるが) 追加のデッドタイムが生じる為、量子ビーム加速器実機運転の繰り返し時間 5 Hz に追いつかず、データ損 失が生じる。これを克服するために、読み出しボードの改良を行った。これまで使っていた DAQ ボード・ SEABAS1 をアップグレードした SEABAS2 を製作した(図 1)。新しいハードウェアの導入にともない、ソ フトウェアのアップグレードを行った。INTPIX4 にはアナログ出力が 13 ポート用意されているので、パラ レル読み出しを行う事で、1 画像分読み出すのに 15 ms で済み、計算上 60 Hz でデータ取集ができるように なる。実際には、データ記録を行わない場合は読み出し速度 60 Hz をほぼ達成しているが、データ保存を伴 う場合には 20 Hz と速度低下が起こる。これについては原因究明中である。しかしながら、20 Hz で X 線動 画を取得できるようになり、また、量子ビーム運転時の繰り返し時間 5 Hz に十分対応できるようになった。



図 1: INTPIX4 基板および SEABAS2 DAQ 基板写真

B) 高抵抗基板 (FZ-SOI) を用いて製作した INTPIX5 の評価試験

前年度は低抵抗基板(CZ-SOI、7000hm-cm)を用いて製作した INTPIX5 について評価試験を行ったが、 今年度は高抵抗基板(FZ-SOI、7kOhm-cm)を用いて製作した INTPIX5 が完成したので評価試験を行った。 CZ-INTPIX5 の場合、260 um 厚のセンサーを全空乏化させるための電圧は 300 V であるが、常温ではリーク 電流が大きいために動作電圧は 100V 程度、すなわち部分空乏状態で運転を行っていた。一方、今回製作し た FZ-INTPIX5 について裏面処理の改良を行った結果、常温におけるリーク電流がおよそ二桁低下し、高電 圧印加時の急激なリーク電流上昇が起こらなくなった。高抵抗基板センサーの利点は低い電圧でも全空乏化 を達成できることであり、電圧 170 V で 500 um 厚センサーをほぼ全空乏化でき、かつ致命的な画像欠陥は起 こらず、良好な状態で運転できるようになった。このセンサーに対し、KEK-PF の放射光単色 X 線(16 keV) を裏面照射し、X 線テストチャート画像を取得した結果を図 2 に示す。FZ センサーでは CZ センサーと比べ て厚みが 2 倍になっているので空間分解能の劣化が予想されたが、高電圧をかけられるようになったおかげ で 16 um 間隔(31.25 LP/mm)のスリットを CTF(contrast transfer function)値 25-35% で識別できるようになった。



図2:FZ-INTPIX5で得られたX線テストチャート像

2. 量子ビーム加速器実証機および実機評価試験

量子ビーム加速器実証機(LUCX)および実機のX線評価を、SOIイメージセンサーを用いて行った。 量子ビーム加速器実証機(LUCX)のX線評価試験

A) INTPIX4 を用いて、量子ビーム加速器実証機(LUCX)からの X 線評価を行った。発生 X 線エネルギー は9 keV で、繰り返し 3 Hz で運転を行った。レーザー・電子衝突あり・なしで一定数のイベントを取得し、 それぞれで X 線スペクトルを導出し(図 3 左)、それらの差分を取ることで発生 X 線スペクトル(図 3 右) を得た。得られた結果から、INTPIX4 全面に入射した X 線数は約 6000/collision となり、レーザー・電子衝 突システムの仕様から予想される X 線数とオーダーで一致した。

※ここで使用したシステムについては「X線測定および利用研究(早稲田大: 鷲尾研)」を参照のこと。



図3:256×256 ピクセル、788 衝突イベントから得られた量子ビームX線スペクトル。3×3 ピクセルクラ スタリング補正を行っている。衝突がないイベント中ではガンマ線バックグラウンド(BGD)による寄与の み観測される。

また、SOI センサーの前にサンプルを置き、X 線像撮影試行実験を行った。ガンマ線バックグラウンドが 大きかったが、X 線エネルギー(ピクセル ADC 出力、ADU 値)でカットをかけることにより X 線像を取得 できた。図4に、12000 collision 蓄積して得られた赤唐辛子の X 線像を示す。SOI センサー出力 13 ブロック 毎に固定パターンノイズが見られるので、これらの原因を究明しノイズを除去することが今後の課題である。



図4:赤唐辛子のX線像。12000 collision 蓄積

B) 量子ビーム加速器実機の X 線評価試験

INTPIX4 および INTPIX5 を用いて、量子ビーム加速器実験の X 線評価を行った。ガンマ線バックグラウンドが大きいことに加え、レーザー・電子衝突頻度が非常に低かったが、レーザー・電子衝突あり・なしで一定時間のデータ収集を行いスペクトルを比較した結果、X 線エネルギー 28keV のところに X 線ピークを発見し、STF 加速器でもレーザー・逆コンプトン散乱による X 線をとらえることに成功した。統計が少ないために X 線イメージング応用研究には至らなかったが、SOI-X 線ピクセルセンサーがレーザー・逆コンプトン散乱実験の評価にも役立つセンサーであることを確認した。

※ここで使用したシステムについては「電子ビーム・レーザー衝突技術の開発(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)」参照のこと。

3. 成果のまとめ

この5年間で、X線GEM開発、およびSOI-X線ピクセルセンサーの開発を行った。X線GEMは大面積 のものを製作することができるので、コンクリート内部の非破壊検査等に有利である。高精細で物体内部、 あるいは生物内部をX線透視する用途としてはSOI-X線ピクセルセンサーが有望であることがわかり、実 用化に向けて開発を進めてきた。当初はバックゲート効果の問題や、放射線耐性の問題があり、X線像を得 るまでに至らなかったが、新しいプロセスを導入する等開発に改良が加えられた結果、1.5 cm角程度の大面 積・高精細ピクセルセンサーの試作に成功し、高精細X線像の高速撮影を実現できた。レーザーコンプトン X線発生装置の評価もできるようになり、日本国内でいままでにない新しいX線検出器を開発し実用化でき る目途が立ったと言える。

開発スタッフ

責任者:幅淳二(高エネルギー加速器研究機構)

担当者:宇野彰二、新井康夫、内田智久、三好敏喜、村上武、池本由希子(以上 高エネルギー加速器研究 機構)、武田彩希(総研大)

H. X 線測定および利用研究 X-ray Measurement and Its Application Researches

概要

早稲田大学では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、X線検出器開発および 利用研究に向けた検討を行っている。レーザーコンプトン散乱によって生成されるX線に特化した特徴とし ては、散乱角が広いため大面積の撮像が容易であること、線源サイズがレーザーもしくは電子ビームの大き さに一致するため極限まで小さくすること可能である点である。これらの特徴を評価することを目的とし、 本年度は超伝導線形加速器試験施設(STF)及びKEK小型電子加速器(LUCX)における検出・評価試験を 行った。これまでに開発したレーザーコンプトン散乱X線検出に特化した検出器を用い、X線検出を行うと ともに検出器評価及びこの検出器を用いたX線評価を行った。

1. はじめに

今年度は KEK の超伝導線形加速器試験施設(STF)及び小型加速器(LUCX)における X 線検出試験を行った。STF においては超伝導加速器を用いた最初のレーザーコンプトン散乱試験に対し、我々のグループで 実績のある MCP (Micro-Channel Plate)検出器を用いた X 線検出を試みた。LUCX においてはすでに前年度 より X 線を検出しているが、本年度アップグレードが行われたことにより、再度 X 線の計測・評価及び X 線イメージングの取得を行った。STF では初めてのレーザーコンプトン散乱 X 線の検出に成功するとともに、 バックグラウンドの評価やビーム調整に使用し、非常に有用なデータを取得することができた。LUCX では アップグレード後の 150 バンチ電子ビームを用いた 9 keV レーザーコンプトン X 線の検出に成功し、これを 用いた様々なイメージング評価を行った。

2. 超伝導加速器試験施設(STF)におけるX線検出試験

本年度稼働を開始した STF 加速器においてレーザーコンプトン散乱 X 線検出試験を行った。これまでの 我々の経験・実測を踏まえ、最も検出しやすい MCP 検出器を STF トンネル内に設置し、バックグラウンド 評価試験、X 線検出試験を行った。MCP を設置した様子を以下の図1に示す。





図 1: STF に設置した MCP 検出器

検出器はレーザーと電子ビームの衝突点から6m程度(日によって異なる位置に設置しているため、通常の距離として)下流に設置している。このMCPをバックグラウンドモニターとして、電子ビーム起因のバックグラウンドが最小になるように、かつ衝突点で絞られているように電子ビームを調整する。調整後のバックグラウンドシグナルを図2(A)に、衝突点に設置されているタングステンワイヤにビームを当てた際の信号を(B)に示す。



図2: MCP で検出したバックグラウンドシグナル (A) とワイヤーターゲットからの信号 (B)

図2の紫線が MCP からの信号を示しており、緑線は BPM の信号を示している。BPM の信号からビーム が生成されていることがわかるとともに、ワイヤーターゲットに衝突させた際には MCP で信号が得られて いることがわかる。図2(A)に示すように、バックグラウンドは1パルスあたり1イベント以下であり、 クシのようなパルス信号がバックグラウンドとしてたまに観測することができる。このバックグラウンド信 号は ADC Count として、バンチあたり1Count 以下であり、生成・検出される X 線の量としては 1Count 以 上が見込まれているため、レーザーコンプトン散乱 X 線の検出は可能であると結論し、試験を行った。

レーザーコンプトン散乱 X 線生成試験の際には、レーザー・ビーム衝突点のスクリーンにおいてレーザー と電子ビームの位置を合わせ、レーザーとビームのタイミングが一致するところを探す。レーザーとして光 共振器を用いているため、レーザーの位相を 360°スキャンすることによって、一致したところで X 線が検 出されることになる。STF で行ったタイミングスキャン結果の一例を以下の図 3 に示す。



図3の縦軸は蓄積されているレーザーが ON の場合(蓄積されている場合)と OFF の場合(蓄積されて いない)に分け、差し引いた値を用いている。レーザーコンプトン散乱 X線が生成されていない場合には"0" になるべき値である。1 周期、360度スキャンすることによって 276度付近にピークが観測されていること がわかる。検出された信号強度としては 764Count であり、X線の数としては 85 個程度にあたる。ビームや レーザーのパラメータから計算される結果と比較すると約 1/2 となっており、多少少ないものの一致してい ると考えている。また、レーザー強度と X線強度の関係が線形であることや、図3のタイミングスキャンの ピークの幅などが計算と一致していることから、間違いなくレーザーコンプトン散乱の信号を検出している と結論することができる。超伝導線形加速器では初のレーザーコンプトン散乱 X線検出であり、非常に有意 義な成果である。他の検出器を用いた試験結果やビーム・レーザーのパラメータに関しては他のグループの 報告を参照されたい。ここでは、我々の検出器によってレーザーコンプトン散乱 X線を検出し、計算との比 較がほぼ一致していることのみ示すことにする。

KEK 小型電子加速器(LUCX)における X 線生成試験

KEK 小型電子加速器(LUCX)では昨年度までにレーザーコンプトン散乱 X 線によるイメージングに成 功しており、本年度は加速器、光共振器ともにアップグレードされた。光共振器としては、従来の2枚ミラ ーの共振器から4枚ミラー構成の共振器(図4)に変更され、衝突角度もこれまでの20°から7.5°に改善さ れた。



図 4: LUCX に設置された 4 枚ミラー光共振器

加速器側も電子銃を 3.6Cell RF 電子銃に、加速管を 3 m 進行波管から 12Cell 定在波管にアップグレードされた。このアップグレードにより 600 倍の X 線数の増強を見込んでおり、12 月時でも 10 倍程度の増強が見込まれていたため、X 線生成試験に踏み切った。STF や前年度の LUCX での試験同様に衝突点中心に挿入したスクリーンにてレーザーと電子ビームの位置を調整し、タイミングをスキャンした。その結果を次の図 5 に示す。



図5:LUCXにおけるタイミングスキャンの結果

図を見てわかるとおり、約180°の位相の時にX線が生成されていることがわかる。その後、衝突を最適 化するために水平・垂直方向の衝突位置をスキャンした。その結果を図6に示す。



図 6:水平(A) 垂直(B) 方向の位置調整

図のように電子ビームの位置を調整し、最適な衝突が実現できるようにしている。また、水平方向は角度 を持って衝突しているため、あまり情報が得られないが、垂直方向(B)に関しては、電子ビームサイズ・レ ーザーサイズに関する情報を得ることができる。(B)図は電子ビームとレーザーの畳み込みのプロファイル となっており、電子ビームサイズが既知(95 µm)であることから、レーザーのサイズは 80 µm と求めるこ とができる。次にレーザー強度に対する X 線強度の関係に関して確認を行った。



図 7: レーザー強度と MCP 信号の関係

図7を見てわかるとおり、レーザー強度に対して MCP 信号強度が線形に上がっているため、実際にコンプトン散乱の信号を検出していることが確かめられる。レーザー強度"0"の際の信号はバックグラウンドを示しており、信号との比はほぼ1対1で検出できていることも見て取れる。今回の試験に際しては23 MeV の電子ビームと 1064 nm のレーザー光を 7.5°で衝突させて行った。計算上、得られる X 線のエネルギーは9 keV 程度であり、これまでの実績からこの計算に乗るものと考えている。所有している MCP は9 keV での検出効率の校正を行っていないため、X 線数に関して正確な議論をすることはできないが、校正している 28 keV での検出効率 5%を用いると約 1500 photons がパルスあたり検出器に入り、トータルで 7.4 × 10⁵ photons/sec が生成されていたことがわかる。計算上では 8.25 × 10⁶ photons/sec 程度が生成される予定であり、1 ケタ程 度差異がみられる。これに関しては、9 keV が MCP の主要構成元素である Ni の K-edge とほぼ一致している ため、検出効率が想定している 5%よりも小さくなっているのではと推測している。実際の生成 X 線数の計測に関しては KEK 検出器班の SOI 検出器によって測定可能であろうと考えている。

次に生成した 9 keV の X 線によるイメージングを行った。イメージング用のセットアップは昨年度と同様 に蛍光面付 MCP とイメージインテンシファイヤを用いた。取得した画像を以下に示す。



(A) 魚の骨

(B) 花のつぼみ

(C) 唐辛子

図8:9keV レーザーコンプトン散乱 X線で取得した X線像

昨年度同様にレーザーコンプトン散乱により X 線像を取得することに成功した。9 keV の X 線では非常に 吸収されやすいため、非常に軽い元素の被写体を用いた。それぞれ X 線の光子数がまだ足りないこともあり 画像は粗いが、細かい構造まで計測できていることがわかる。



⁽A) 9 keV X 線

(B) 15keV X 線

図9: ピーナッツの画像のエネルギー9keVと15keVの比較

次に昨年度取得したピーナッツと同様のサンプルを9keVのX線によっても取得した。図9を見てわかる とおり、内部の種はどちらも透過しないが、『皮』の部分に違いがみられる。9keVでは多少の吸収があるの に対して、15keVではほぼ透過しており、端部のみ吸収がみられることがわかる。これまでにX線のエネ ルギーは計測するに至っていないが、このような結果を見ても予想通りのエネルギーのX線が生成されてい るであろうことがわかる。

4. 成果のまとめ

KEK の超伝導加速器試験施設(STF)及び小型電子線加速器(LUCX)においてレーザーコンプトン散乱 X線生成試験を行った。STFにおいては MCP を用いたバックグラウンドスタディを行ない、電子ビームを 調整することによって十分X線を検出できるレベルのバックグラウンドに削減できていることを確認すると ともに、レーザーコンプトン散乱X線の検出に成功した。検出した信号の強度や幅、レーザー強度との関係 を確認することで、間違いなくレーザーコンプトン散乱X線であることを確認するとともに、X線強度とし てもほぼ計算と一致する結果を得ることができた。LUCXにおいてはアップグレードしたレーザー蓄積装置・ 加速器システムを用いたX線生成試験を行った。これまでに検出の実績はあるが、新たに導入したレーザー・ 電子ビームによって従来より10倍程度強度の大きいと予想されるX線の生成に成功した。X線数に関して は想定したX線のエネルギーが想定よりも低かったために十分な評価はできていないのが現状である。また、 X線イメージに関しても同様に取得することができ、15keVのX線との差異も確認することができた。X 線検出器としてはレーザーコンプトン散乱検出用に特化した検出器を開発することができ、評価として十分 な成果を挙げることができたとともに、X線イメージの取得によって屈折コントラストの確認や利用として の準単色X線による画像取得をすることに成功した。今後のX線数の増強により、より解像度の高いX線 イメージの取得や位相コントラストイメージングの取得などが期待できると考えている。

開発スタッフ

責任者:鷲尾方一(早稲田大学理工学術院) 担当者:鷲尾方一、坂上和之(早稲田大学理工学術院)

I. 電子ビーム・レーザー衝突技術の開発(システム統合化)と プロジェクトの総合的推進 Development of Technique for Collision between Electron and Laser Beams and Project System Integration

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為に、レーザー蓄積装置と常伝導の加速器を による X 線の生成試験および利用研究に必要な基盤技術開発を行っている。平成 24 年度はレーザー蓄積 装置と高エネルギー加速器研究機構・先端加速器試験棟内に設置したマルチバンチ電子ビーム生成加速器 (LUCX)の改造を行い、レーザーコンプトン散乱 X 線生成の強度を 2 × 10⁵ photons/sec から 10⁸ photons/sec 以上に増強できるように改良を進めた。蓄積レーザーパルスエネルギーを増強するために Burst Amplification 試験を行い、15 倍以上のレーザーエネルギー強度が実現するように 4 枚ミラー平面新光共振器の製作を行 った。また、電子ビームパルス内のバンチ数を 100 から 1000 以上にするための高周波発生源の大電力高周 波パルス幅の拡張調整も継続して進めている。平成 24 年度秋から LUCX X 線生成実験で、10⁸ photons/sec 以 上を目指した高輝度 X 線検出測定を行ったが、6.4 × 10⁶ photons/sec までしか確認出来なかった。一方、超伝 導線形量子ビーム試験加速器 (STF)が完成したので、平成 24 年度秋からレーザー逆コンプトン衝突による X 線生成実験に挑戦して、28 keV X 線検出に成功した。

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上げている。しかしながらこのような高輝度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ー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 加速器やレーザー蓄積装置、トータルとしてのX線生成システム構成に至る全ての開発で指針となる重要な ものである。

尚、小型超伝導加速器システムによる高輝度な X 線生成実験装置の加速器部は完成して、2012 年 3 月末 までに 1 m 秒のマルチバンチ(162,500 bunches/pulse)電子ビーム生成が確認でき、2013 年 3 月 28 keV X 線 検出に成功した。その実験結果報告も記す。

2. LUCX でのマルチパルス X 線生成実証試験

2011 年度、衝突技術を高めるために常伝導線形加速器とレーザー蓄積装置を用いたレーザー逆コンプトン 散乱(ICS)による X線生成実証試験装置小型加速器(LUCX)の改造を行い、得られた成果は既に報告した ので、2012 年の追加改造後の X線生成強度増強実験の報告を行う。図1にLUCXの改造後の上流からの写 真を示す。

ビームラインの構成上 3.6 Cell RF 電子銃単体でのビーム診断は困難であるため、生成した電子ビームの加速後のエネルギーを示すことになる。12 Cell 定在波加速管後の現状のビームパラメータ等は以下ようになる。



図1:改造後の小型常伝導線形加速器(LUCX)の上流からの写真

3.6 Cell RF 電子銃とはカソードを含むハーフセルと呼ばれる構造に加速高周波の半波長の長さを持ったフ ルセルを 3 個付属した形の定在波空胴である。これまで RF 電子銃ではフルセルが 1 個の 1.6 Cell 構造が主 流であったが、より高いエネルギーを生成することを目的として開発を行った。1.6 Cell 型では最大 5.5 MeV 程度の電子ビーム生成が確認されているが、3.6 Cell 型では 10 MeV 以上の電子ビームも期待できる。3.6 Cell RF 電子銃によって生成した電子ビームのエネルギー測定結果を図 2 に示す。図を見てわかる通り、3.6 Cell RF 電子銃単体によって最大 9.6 MeV の電子ビームを得ることに成功している。その際のダークカレン トも 236 pC/pulse と非常に小さいことがわかる。ICS X 線生成試験においては長時間安定運転を行えるよう に 8.5 MeV のエネルギーにて運転している。長期高周波エージング後に 30 MeV 以上の電子ビームが得られ るが、現状 ICS X 線生成試験時におけるビームパラメータは表 1 のようになっている



図 2:3.6 cell RF Gun (写真) と電子ビームエネルギー及び暗電流



図3:150バンチ電子ビーム信号と各バンチの運動量測定

Energy	23 MeV
Bunch charge	0.9 nC
Number of bunches	150
Beam size at the collision point (1σ)	85 μm (H) \times 95 μm (V)
Bunch length (FWHM)	15 ps
Bunch spacing	2.8 ns
Energy spread	0.12%
Energy difference	0.06% (rms)
Normalized rms Emittance	$10\pi \text{ mmmrad (H)}$ $7\pi \text{ mmmrad (V)}$

表1: ICS 実験時の電子ビームパラメータ

バンチ電荷は CT (Current Transformer)、ビームサイズは OTR 光、エミッタンスは Q スキャン法によって それぞれ計測している。エネルギーに関してはバンチ内のエネルギー拡がりとマルチバンチ内のバンチ毎の エネルギー差とを分けて表記している。設計パラメータの衝突点サイズやバンチ数などが達成されていない が、ICS X 線生成試験を行うのに十分な性能が得られている。また、以前と比較してもバンチ電荷量やバン チ数、エネルギー差が改善されている。

図3を見てもわかるとおり、電荷量には多少の分布があるが、綺麗な150バンチトレインが生成されていることがわかる。また図3にマルチバンチ内のエネルギー差の測定結果も示した。150バンチに渡り非常に

エネルギーの揃ったビームが生成されていることがわかる。これは電子銃・加速管の両方を定在波管とし、 独立の RF 源(クライストロン)によって RF を供給していることで達成されている。

2008 年度に得られた X 線強度から 10⁸ photons/sec 以上の X 線強度を得るには、電子ビームサイズで 4 倍、 電子ビーム強度で 10 倍、レーザー強度で 20 倍にする必要がある。X 線強度が三桁以上増えるように要素技 術開発を取り入れた X 線生成運転を積極的に進めている状況にある。

3. パルスレーザー蓄積共振器



図4:新4枚ミラー平面光共振器の概念図と写真

電子加速器システム同様にレーザー蓄積共振器もアップグレードを行った。これまでレーザーパルスの蓄 積強度を制限していたのはレーザーパルスによるミラー破壊であった。パルスレーザーによるミラー破壊の 閾値は概ね 10 GW/cm² 程度である。このような制限の下、蓄積強度を大きくするためにミラー上におけるレ ーザーサイズを大きくすることを目標に新しい光蓄積共振器を設計した。ミラー上のサイズを広げるために 非常に長い光共振器を構成した。しかしながらこれまで用いていた凹面鏡 2 枚構成の光共振器ではミラーの 設置精度に対する要求が非常に厳しく、共振器長を長くすることが困難であった。そこで、凹面鏡 2 枚と平 面鏡 2 枚の 4 枚のミラーによって構成されるレーザー蓄積装置を設計・製作した。本章ではその 4 枚ミラー 平面光蓄積共振器に関して説明する。

3.14枚ミラー平面光蓄積共振器

前述の通り、ミラー上のレーザースポットサイズを大きくし、共振器内の蓄積強度を向上させるために4 枚のミラーで構成された光蓄積共振器を設計した。光共振器の構成は図4に示す通りである。共振器の周長 は7.56 m であり、電子ビームの周期と同期した357 MHzのモードロックレーザーパルスが9個蓄積される 構成になっている。平面鏡から入射されたレーザー光は向かい側の凹面鏡によって衝突点に集光され、電子 ビームと衝突する。電子ビームを集束する四極電磁石は光共振器真空容器と一体構成となっており、電子ビ ームも良く集束でき、光共振器の長さも大きく取れ、かつ衝突角度が7.5度と非常に浅い角度になるように 設計している。4枚のミラーはそれぞれ真空容器とはベローズで切り離されており、角度や位置を調整でき るようになっている。また、4枚のミラーと4つの四極電磁石は別の架台に乗っており、4枚の共振器ミラー は独立に位置を調整できるようになっている。これによってレーザーと電子ビームの衝突位置は調整できる。

4枚の共振器用ミラーには昭和オプトロニクス社製の非常にロスの少ない2インチ径のミラーを用いている。また、ミラーにおける反射角は3.75度となるが、この角度で最も良い性能が出るように反射膜コーティングも最適化されている。凹面鏡の曲率半径は1890mmとしており、最終的には凹面鏡間の距離を調整することによって、集光された共振器内衝突点レーザープロファイルを実現する。平面に4枚のミラーを構成

し、反射角が存在している状態で凹面鏡を用いているため、現在の光共振器では非点収差が生じる。設計値 としては Sagittal (Vertical) 方向には 25 mm まで集光できるが、一方 Tangential (Horizontal) 方向には 54 mm までしか集光できない。これに関しては超伝導線形加速器 (STF) において収差を補正した光蓄積共振器の開 発が行われており、現在評価が行われている。実際に製作した光共振器の写真も図4に示す。

3.2 逆周回光路の利用によるバースト運転の安定化

LUCX では S-band 常伝導線形加速器からの電子ビームを用いて ICS 実験を行っている。常伝導加速器からの電子ビームはパルスを形成して生成される。LUCX の現状の場合では、2.8 ns 間隔のマイクロパルスが 150 個連なって 420 ns の時間幅のマクロパルスを構成する。一方レーザー蓄積共振器では、通常パルスを常 に供給し続け、共鳴が飽和している(共振器内のロスと入射光強度が釣り合っている)状態で使用する。つ まり 2.8 ns 間隔で常にレーザーパルスが衝突点を通過している状況であり、このような時間構造にミスマッ チのある状態では、レーザー光は有効に使用できていない。そこで我々はバースト運転という手法を開発し、 試験を行ってきた。この手法は、図 5 の構成図を見てもわかるが、共振器に入射するシード光と光蓄積共振 器の間にパルス型の増幅器を導入することで、電子ビームが衝突点に到達するタイミングのみ非常に強いレ ーザー光を入射し、共振器内においても強いレーザーパルスを蓄積する技術である。これによって十分な ICS X 線パルスを得ることができる。



図5:逆周回を用いたバースト運転の概念図

しかしながらこの手法にも問題点があった。レーザー蓄積共振器はその内部において波長1mmのレーザ ー光の位相を一致させて重ねあわせるため、ナノメートル以下の精度での制御が求められる。このような制 御を実現するためにピエゾ素子を用いた位置制御を行っているが、バースト運転時にはレーザー光強度が非 常に強くなるために制御を継続することが困難であった。つまり、制御対象となる共振器ミラー位置情報を レーザー強度から得ているため、バースト時には一度制御を止める必要があった。これによってバースト時 のレーザー蓄積強度の揺れは非常に大きく、ほぼ100%の幅で揺れてしまっていた。そこで今回4枚ミラー 平面光共振器となったことで考案した手法が"逆周回を利用したバースト運転"である。その概念図も図5 に示す。

図中の実線は通常のバースト運転の光路を示している。これはICS衝突するレーザーパルスの光路であり、 レーザーパルスは光共振器内の衝突点で絞られる。シードとなるモードロックレーザー光はバースト増幅器 を通ってパルス的に増幅され、共振器に入射されている。逆周回光路は点線にて示している。バースト増幅 器前に分けられたレーザー光は EOM (Electro-Optic Modulator)で変調をかけられた後、光共振器に逆向きの 周回をするように入射される。4枚のミラーで構成され る周回型の共振器であるので、このような逆向き周回 も可能となった。共振器内のレーザー光のモードは周 回の向きにかかわらず共振器ミラーの位置によって決 められるモードしか共鳴できない。したがって使用す る基本モードである TEM₀₀ モードは順周回・逆周回に 関わらず同じ共振器長の条件において同じ共鳴条件を 満たす。つまりバースト増幅を行っていない逆周回光 路によって制御信号を作り出すことでこれまでの問題 点を解決し、安定なバースト運転が可能となった。共 振器の制御信号は PDH (Pound-Drever-Hall) 手法という 広く使われている手法を用いている。これは EOM で変



図6:逆周回の制御信号と共鳴点の波形

調をかけた光を共振器に入射し、反射された光(共振器に蓄積されずに反射した光と共振器から漏れ出した 光の重ね合わせ)を変調波で De-modulation することによって共鳴点で正負が切り替わる信号を取り出すフ ィードバック制御技術である。その様子を図6に示す。一番上の波形から共鳴制御用の信号、逆周回の共鳴 の様子、順周回の共鳴の様子となっている。順周回と逆周回の共鳴ピークが全く同じ位置、全く同じ形で観 測できることがわかるとともにピークの頂点において正負が反転する制御信号が生成できていることも見て 取れる。このような新しい手法を用いた制御を行った結果、蓄積強度の安定度は格段に向上した。従来ほぼ 100% 揺れていた強度は15%rms まで改善され、非常に効率よく ICS 実験を行うことが可能となった。

3.3 ICS X線生成実験時におけるレーザーパラメータ

このように構成したレーザー蓄積共振器によって電子ビームとの衝突点に生成した現状のレーザーのパラ メータを表2に示す。電子ビーム同様にレーザー光側もまだ設計値には到達していないが、ICS実験を行う のに十分な性能である。Finesseは共鳴の幅を計測することにより算出し、蓄積強度に関しては、入射ミラー 正面の凹面ミラーの透過光の強度と透過率から算出した値である。現時点では共振器のQ値であるFinesse は安定に動作させるために小さくしていることで、蓄積強度が0.3 mJ/pulseと小さい値になっている。この 値はまだまだミラーの破壊閾値と比べて小さい値であるので、今後Finesse等を改善することで5 mJ/pulse 程度まで改善できる予定である。

Energy	1.17eV (1064 nm)
Repetition	357 MHz (2.8 ns)
Intensity	0.3 mJ/pulse
Waist size (1σ)	89 mm × 85 mm
Pulse length	7 ps
Finesse	335.43

表 2: ICS 実験時の衝突点におけるレーザーパラメータ

4. レーザー逆コンプトン散乱実験

表 1・2 に示したような電子ビーム・レーザー光が得られたので、ICS X 線生成試験を開始した。電子 ビーム・レーザー光ともに目標値には届いていないが、十分改善がみられる性能であった。今回の ICS X 線 生成試験ではこれまでと同じ MCP (Micro-Channel Plate)を用いた検出器および SOI ピクセルセンサを用い た初めての ICS X 線検出試験も行った。まず検出器のセットアップを以下の図 7 に示す。



図7:X線検出ラインと検出器のセットアップ

ICS X線は Be 窓を通って大気中に取り出される。 取り出された X線は φ 20 mm の鉛コリメータによ って切り出され、検出器に入射される。検出器は 衝突点から 2.7 m の位置に設置されており、SOI ピ クセルセンサは直動ステージによって出し入れが 可能となっている。また、SOI 検出器がぬけた場合 には MCP によって検出が可能なセットアップとな っている。SOI ピクセルセンサのアパーチャーは縦 14.1 mm × 横 8.7 mm の四角形、MCP は φ 30 mm の アパーチャーを持っている。検出器は電子ビーム起 因のバックグラウンドを極力減らすために鉛のシー ルドで覆っている。

4.1 予想される ICS X 線の特性

初めに表 1・2のパラメータによって想定される ICS X線の特性に関して示す。レーザーと電子ビームの パラメータは表の通りで、衝突角度は 7.5度である。計算はモンテカルロシミュレーションコードである CAIN (Conglomérat d'ABEL et d'Interactions Non-linéaires)を用いて計算した。ICS X線の総量はもちろん、 検出器に入る X線強度に関しても同様に計算した。その結果を表 3 に示す。

Maximum Energy	9 keV
Bandwidth in Pb collimator	8%
Photon flux (total band)	8.2×10^6 photons/sec
Photon flux @ SOI sensor	7015 photons/train

表3:想定される ICS X 線の特性

X線の総量に関しては1秒あたり(パルス繰り返し12.5 Hz)のFluxを、SOI ピクセルセンサにおいて検出 されるX線のFluxとしては後の議論を簡単にするためにマクロパルスあたりの値を示している。また、9keV のX線は空気による散乱が無視できない。Be窓から検出器までは500 mm距離があり、1気圧300 Kにおい てその透過率は0.7程度である。表中のSOIで検出されるX線数としてはこの透過率を乗じた値であること を注意しておく。

想定される X 線強度としては、目標値よりも2ケタ程度小さい値であるが、以前の2×10⁵ photons/sec/ total band に対して 40 倍以上の向上が見込まれることもわかり、ICS X 線生成試験を開始した。これ以上の X 線強度を得るためにはより長い RF パルスを加速空胴に印加するためのエージングが必要であるとともに、 レーザー側はミラーの構成を変える必要があり、時間的な制約もあり試験を開始するに至る。

4.2 MCP による ICS X 線の計測

まずは MCP による試験結果に関して述べる。MCP はこれまでの我々の試験経験から最も電子ビームバッ クグラウンドとの切り分けが可能であった検出器であり、最初の検出には最も向いていると考えている検出 器である。

X線の強度に関しては、9keVでのMCPの校正を行っていないために、MCPによる計測では算出することはできなかった。今後校正を行い、算出できるようにする必要がある。ICSX線生成試験ではタイミングの最適位置を決めるとともに、位置関係に関しても最適位置を決める必要がある。そこで水平垂直方向の位



置を調整して、最適な衝突を実現している。また、垂直方向の関係に関 してはレーザーと電子ビームのサイズの畳み込みとなっていて、衝突点 において両者が絞れていることを確認することができる。その結果は表 1・2 に矛盾するものではなかった。

次に蛍光面のついた MCP によって X 線像を取得した結果に関して示す。

図8は蛍光面 MCP において取得した唐辛子のX線像であり、解像度 は悪いものの、唐辛子の外形や中の種、唐辛子が乾燥して縮んでいる部 分などが見て取れる。

図 8: 蛍光面 MCP による唐辛子の X 線像

4.3 SOI ピクセルセンサを用いた ICS X 線の計測

次に SOI ピクセルセンサによって ICS X 線の検出を試験した結果につ いて述べる。SOI ピクセルセンサは SOI 技術 (2 つのシリコンウェハを絶縁膜を介して張り合わせる技術) を 用いたピクセル検出器であり、KEK 測定器開発室が中心になって開発を進めているイメージセンサである。 接合した片側のシリコンに pn 接合を形成したセンサと、もう一方のシリコン上に読み出し回路を形成するこ とによって、回路とセンサが一体となったモノリシック半導体センサが構成できる。このような構成のセン サによって SN 比が向上するとともに空間分解能も非常に高くなる。今回はピクセルサイズ 17 mm、 ピクセル数 832 × 512 (43 万画素)の SOI ピクセルセンサを用いた。SOI ピクセルセンサの有効検出部厚は 200 mm であり、9 keV の X 線に対する検出効率は 87%である。

SOI ピクセルセンサでは ICS X 線の検出に際し可視的に非常に有効な情報が得られる。9 keV の ICS X 線 に関してはほぼ1 ピクセルのみに信号が得られるが、電子ビーム起因の MeV オーダーのバックグラウンド に対してはシャワーが発生するために数ピクセルに渡って線の形で検出される。これらを解析によって区別 することで、非常に高い SN 比での検出が可能である。今回の ICS X 線試験においては、MCP ではほぼ1:1 の SN 比だったのに対して SOI ピクセルセンサでは 20:1 での検出が達成できた。

また、SOI ピクセルセンサでは、9 keV 付近の X 線にあたる信号の個数を数えることによって ICS X 線強 度を算出することが可能である。検出された X 線強度は 4750 photons/train であり、検出効率の 87% を考慮 すると 5460 photons/train が SOI ピクセルセンサに照射されていたことがわかる。表 4 に CAIN による計算値 との比較を示す。

SOI Sensor Measurement		
X-ray flux on SOI sensor	5460 photons/train	
X-ray flux total band	6.38×10^6 photons/sec	
CAIN Calculation		
X-ray flux on SOI sensor	7015 photons/train	
X-ray flux total band	8.2×10^6 photons/sec	

表 4: ICS X 線強度の実測と計算の比較

表4を見てわかるとおり、実測されたX線強度は計算の8割程度の強度となっていることがわかる。計算にはタイミングや位置のジッターを含んでいないことや、レーザーと電子ビームの位置が完璧に一致していると仮定していることなどから、非常に良く計算と測定が一致している。X線強度としても1秒あたり10⁷ photons/sec に近い強度が得られていることから、我々の常伝導加速器とレーザー光蓄積共振器とを用いた ICS X線源が非常に有効であることを示すことができたと考えている。

次に SOI ピクセルセンサを用いた X線イメージングを行った。その結果を図9に示す。



図8と比較してみれば明らかだが、非常に高空間分解能 でのイメージが取得できていることがわかる。唐辛子の外 形はもちろん、内部の種子や胎座なども非常に鮮明に写っ ており、SOIピクセルセンサが十分にICSX線を計測でき ることを示せた。また、SN比が非常によいデータを取得 できることから、バックグラウンドによる影響を差し引く 必要がなく、さらに MCP に比べて検出効率が高いことも 相まって、ピクセル数が多いにも関わらず1イメージを取 得するのに必要なショット数は10000Shot であった。ビー ムとの同期や読み出し速度など改善できる点はまだ残って いるが、今回初めてのICSX線検出試験で検出に成功する とともに非常に有効な検出器であることを示すことができ た。

図 9: SOI ピクセルセンサによって取得した唐辛 子の X 線像

LUCX 実験のまとめと今後の展望

我々の LUCX グループでは S-band 常伝導線形加速器とレーザー蓄積共振器を用いた ICS X 線源の開発を 行っている。これまでに加速器の小型化のために 3.6Cell RF 電子銃と 12Cell 定在波菅の導入を行い、十分な 性能のマルチバンチ電子ビームが得られることを確認した。特にバンチ毎のエネルギー差に関しては 0.06% と非常に良く制御された電子ビームを確認している。今後の RF エージングの継続によってさらにロングパ ルスの運転が可能となることが見込まれ、より高強度な ICS X 線の生成が可能になると考えている。

衝突用のレーザー蓄積共振器として今回初めて4枚ミラー構成の平面光共振器を用いた。周長を非常に長 くとることによってミラー上におけるダメージを避け、より高強度なレーザーパルスの蓄積を見込んでいる。 今回は周回型共振器の利点を利用し、逆周回光路を用いた共振器制御によってバースト運転の安定化が達成 された。今後共振器の安定化とともに Finesse を向上させ、より高強度なパルスレーザーの安定蓄積が達成 される予定である。また、レーザーの衝突点におけるサイズに関しても共振器の調整によって達成され、現 状の10~20倍程度の蓄積パワーが達成できるものと考えている。

最後に ICS X 線生成試験を行い、総量として 6.38×10⁶ photons/sec の X 線を確認した。これまでの 20 倍以上の X 線強度を達成しているとともに前述の電子ビーム・レーザー光のより一層の改良によってさらなる増強が期待できる。今回は初めての試みとして SOI ピクセルセンサによる ICS X 線検出試験も行った。SOI ピクセルセンサの特徴を生かし、非常に高 SN 比での検出が可能であることを確認するとともに、X 線イメージの取得によって高解像でかつ高効率に検出が可能であることも確認した。今後、より解像度の高いセンサによる検出試験やそれぞれのピクセルのゲインの安定化によって X 線のエネルギースペクトルの計測も可能になると考えている。

今回は目標値まで届かないものの非常に良く改善された ICS X 線生成を示すことができた。今後より時間 をかけて電子ビーム・レーザー光の改善を行えば、1Shot での X 線イメージが取得できるような準単色 X 線 生成が達成可能であることを示すことができた。今後はより一層の改善を行っていくとともに、X 線の位相 イメージング等 ICS X 線生成の利用も見込んだ研究推進を行っていく予定である。

6. STF 量子ビーム高輝度 ICS X 線生成実証実験

図 10 に 2012 年 9 月完成した STF 超伝導加速器と逆コンプトン散乱 X 線発生部の写真を示す。大震災等の影響で半年程度遅れて大電流電子ビーム加速調整から X 線発生の為の衝突実験へ基盤技術開発の総合性能確認実験を推進した。



図 10:超伝導線形加速器 STF での高輝度 X 線生成実験装置の 3D 配置図と衝突点近傍ビームラインおよび 超伝導加速空洞クライオモジュール写真



図 11: 光高周波電子銃で 1 ms Flat Beam (162500 bunches/pulse) 生成。Bunch Charge は 30 ~ 50pC。2 台の 9 cell 超伝導加速空洞通過後 40 MeV になった多バンチビームのバンチ強度分布。平均パルス電流 7.5 mA 加速 運転に成功した。



図 12:平面4鏡光共振器と電子ビームライン衝突部の設計配置および衝突用レーザーハット室後方に置かれた MCP X 線検出器の写真。電子ビームは偏向角 20 度の2 台の偏向電磁石によってレーザーとの正面衝突 軌道を通過する。

また、図10にSTF量子ビーム実験装置の3D配置も示した。この図には主な装置を明記した。図からは 分からないが電磁石磁場エラー・設置エラー等を考慮した軌道調整に必要なビーム診断装置も要所々々に 配置・取り付けも行われた。2012年3月末までにL-band光高周波電子銃から一様な1ms、162500 bunches/ pulse生成に成功した。バンチ当たりの電荷量は40 pC程度であった。電子ビームとレーザービームは正面 衝突させるので、ICS(逆コンプトン散乱)X線はレーザー蓄積光共振器の球面ミラーを透過することにな る。(間に合えば、1 mm厚ミラーかBe薄板に誘電多層膜蒸着した99.99%球面反射ミラーをX線透過側に 使う予定であったが、現状は5 mm厚のミラーを使った。これによるX線の減衰は30%程度である。)X線 輝度を高くするために、電子ビームサイズは10 mmに絞ってレーザーパルスと衝突させる設計であったが、 図15に示したように、約50 mmの電子ビームサイズでの衝突実験になった。最終目標を達成する為には電 子ビーム生成・軌道調整に十分な時間をとる必要がある。



図 13:平面4枚ミラー光共振器のレーザーオプティックスと電子ビーム衝突オプティックス。パルスレー ザーは透過光の形状測定から衝突点で約80mmの円形プロファイルである。

図 12 は小型の偏向電磁石 2 台を使った正面衝突の装置配置を示す。10 mm の電子ビームとレーザーパル スビームが正確に衝突しなければならないので、石定盤にミラー調整駆動機構を固定して真空ベローズが許 す範囲でミラー位置調整が行える平面 4 鏡光共振器を製作した。電磁石および衝突点のビームモニターは別 の位置調整架台に固定し、本装置の初期アライメントは高精度で行った。これらのレーザーシステムの設置 および試運転は 2012 年 9 月から行われ、10 月から衝突実験を開始した。



図 14: ICS X 線生成実験での衝突タイミングスキャン信号。電子ビームとレーザーパルスの正面衝突から ICS X 線が生成されていることを示す。

レーザー発生装置とレーザーパルス蓄積光共振器の調整がタイムリーに進められなかった為に、衝突実験 は12月中旬を過ぎて始まった。光共振器本体の剛性が不十分である為に、光共振器の共鳴維持フィードバ ック(PHD)が安定に保たれなかった。この最終実証実験をKEKの首脳部の許可を得て2013年3月まで延 長した。4枚のミラー支持が光共振器のテーブルと一体になるように改造を行い、さらにフィードバックを 最適化する調整を行うことによって、図14に示したレーザーパルスと電子ビーム衝突で生成されたX線信 号を3月中旬に検出することに至った。衝突信号のX線検出は使いなれているMCP検出器で行った。



図 15: 衝突点での電子ビームサイズ測定によって、水平 43 mm (rms)、垂直 53 mm (rms)。衝突時のレー ザーパルスエネルギー約 15.4 mJ、形状円形約 80 mm (rms)。衝突時のレーザーパワーは透過光の同時測定 により約 2.7 kW であった。

図 16 に示されたエネルギースペクトルは SOI 検出器で測定した。シミュレーションコード CAIN で計算 した 28 keV の X 線検出に成功した。これらの実験成果は3月29日まで関係者が諦めないで装置の改善を行 いながら得た不十分な結果であったが、重要な問題点は明確になったと同時に解決策も明らかに成った。光 共振器を支える石常盤の選択は正しいが、移動機能を待ったもので各ミラーを支持固定する機構を構成する 部品の機械組み立て設計が非常に悪く各ミラーにインコヒーレントな許容できない大きさの振動を与えてし まったことが強力な共鳴フィードバックを邪魔していた。ミラーの反射率が湿気や埃によって汚染され低下 したことと移動機能を犠牲にしたミラー間固定具の追加で短時間の共鳴フィードバックを動作させることに 成功し、図 16 の信号を得た。



BG subtracted X-ray spectrum

図 16: 逆コンプトン散乱(ICS) X 線測定を SOI 検出器で行い、そのデータから得られた X 線スペクトラム。 X 線フラックス量は両ビームの測定パラメータから 10⁶ photons/sec 程度であり、目標の 10000 分の 1 以下で あった。

7. 総括

2008 年度の X 線生成実験では、マルチバンチ加速に対して次のような重要な知見が得られていた。ビームサイズ、パルス長がそれぞれ 30 mm、10 ps のレーザーパルスと 60 mm、20 ps の電子ビームとの衝突を行い、衝突タイミングを 1 ps の精度で、また衝突位置を数 mm 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た。また、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た。生成 X 線量を最大にする為に、レーザーパルスの位置をムーバー架台で動かすことによって電子ビームに合わせている。衝突点でビームプロファイルの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。位置合わせ精度はミクロン以下であるので、電子ビームサイズが 10 mm になっても問題ない。これらの調整技術は高い再現性があり、ICS X 線生成装置の確立した技術になっている。

4枚ミラー共振器を使った LUCX での X 線生成実験に STF での経験を取り入れれば、10⁹から 10¹⁰の ICS X 線光子を毎秒検出できる技術は確立できる。また、パルスレーザーによる 3D-4 ミラー共振器の実用化と 周回発振型レーザー蓄積法の実用化を強力に進めることによって、偏光軟 X 線の利用に結び付く光源装置の 付加価値を実証できる可能性が見えてきた。LUCX において、レーザーパルス蓄積装置に蓄積したレーザー パルスと 1000 バンチ以上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、高精度衝突技術 の開発とレーザー蓄積技術開発は非常に ICS X 線源を実用化する重要な技術である。

8. プロジェクトの総合的推進

高周波電子源を使って、今までの 300 nC/300 nsec 電子ビーム生成実績を向上するために、新しい電子源 (1.6 cell RF Gun および 3.6 cell RF Gun)を製作した。また、5 MeV or 10 MeV 大強度電子ビームとレーザーパル スを高繰り返しで衝突させて、レーザー逆コンプトン散乱で数 keV から 50 keV の X 線生成実験が行えるように装置を改造して来た。2009 年度に 3 次元 4 枚ミラーリング光蓄積装置を試作して、その真空用光蓄積装置を 2011 年度秋に 1.3 GeV 電子蓄積リングに設置した後、高輝度ガンマ線生成に成功した。一方、軟 X 線生成によって実用試験を行えるように、実験装置の改造を進めてきたが、大強度電子ビーム生成の安定 化やレーザーパルス蓄積装置の高精度制御技術の実用化が遅れ 2012 年度秋まで実証試験を待つことになっ てしまった。

さらに硬 X 線生成を現状の LUCX で高輝度化できるように 0.9 m 長の S-band booster 加速管(12 cell booster)製作を行った。この加速管は定在波空洞で長パルスビーム加速が容易に行えるように今使用している 3 m 長の進行波加速管と 2012 年 6 月末に交換した。その後、1000 bunches 以上とレーザーパルスとの衝突による高輝度 X 線生成を常伝導小型線形加速器で実現する為、RF Aging を行っているが 500 bunches/pulse までの生成確認を行い、X 線生成では 150 bunches/pulse の生成・加速までしか運転できていない。小型加速器の RF Aging の状況から 1000 bunches/pulse までの生成・加速実験は行えるように成る感触はある。

本基盤技術開発研究では、実証試験超伝導加速装置を2012年春に完成させて、2012年12月までに高輝 度X線生成実験によって性能を実証する予定であったが、2013年3月にX線の信号を検出して性能実証実 験は終了した。しかし、実用的な小型高輝度X線源を製作する為に必要とする基盤技術に関する知見は十分 に得られ、実用化レベルの小型高輝度X線源の設計は可能である。ここ数カ月で必要とする基盤要素技術開 発の進捗状況を確認しながら、実証試験装置の詳細設計および装置製作を進めることは可能である。本プロ ジェクト関係者のコミュニケーションと要素技術に関する技術検討会は非常に重要である。以下に示す報告 会、多くの技術検討会および先端技術に関する公開を積極的に推進している。

外部有識者を含む先端加速器推進室報告会や学会で本計画について報告した。技術検討会等の開催は参画 各機関を含めて 73 回行った。プロジェクトで得られた成果を発信するための Web ページを公開している。 プロジェクト Web ページ: http://kocbeam.kek.jp/index.html 参照。高輝度光子ビーム源開発室ニュースを四半 期毎に配布した。

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・調整に努めた。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努力した。

2009 年度から「高電圧 DC 電子源開発」の拡充計画として高安定高電圧電源開発を株式会社日立ハイテク ノロジーズが担当しているので、日本原子力研究開発機構と日立ハイテクノロジーズ間の研究開発調整を高 エネルギー加速器研究機構が行い、2012 年度末までに 500 ~ 750 kV 数十 mA 以上の電子ビーム生成実証試 験を遂行できるように研究開発を調整した。その結果、500 kV、10 mA 電子ビーム生成の見通しが得られた。 また、広島大学と研究協力機関大阪大学産業総合研究所が「高性能光 L-band RF Gun 開発」を進めている。 これについても L-band RF Gun 性能実験設備を所有する高エネルギー加速器研究機構が研究開発の調整と統 合を行っている。さらに、2009 年度から福田グループが小型高周波源開発を行った。2012 年度秋からの統 合実証実験に向けて順調に基盤技術開発が進んだ。

プロジェクトで得られた成果については、国内外において積極的に公表し、併せて超伝導加速空洞やその 周辺機器の最先端知見を得ることで、今後の展開に資するよう調整していく。

6. 参考文献(2012年度の発表および掲載論文)

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果(発表題目、口頭・ 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
Status of Main Linac Cryomodule Development for Compact ERL Project (口頭)	K. Umemori, E. Cenni, T. Furuya, H. Sakai, M. Sawamura, K. Shinoe	IPAC2012 New Orleans, USA	2012年5月	国外
Field Emission Simulation for KEK-ERL 9-cell Superconducting Cavity (ポスター)	E. Cenni, T. Furuya, H. Sakai, K. Umemori, M. Sawamura, K. Shinoe	IPAC2012 New Orleans, USA	2012 年 5 月	国外
Vertical Test Results for ERL 9-cell Cavities for Compact ERL Project (ポスター)	K. Umemori, E. Cenni, T. Furuya, H. Sakai, M. Sawamura, K. Shinoe	IPAC2012 New Orleans, USA	2012 年 5 月	国外
Multi-bunch Beam Generation by Photo-cathode RF Gun for KEK- STF (ポスター)	M. Kuriki, S. Hosoda, H. Iijima, G. Isoyama, R. Kato, K. Kawase, H. Hayano, J. Urakawa, K. Watanabe, K. Sakaue, A. Kuramoto, S. Kashiwagi	IPAC2012, TUPPD034, New Orleans, USA	2012 年 5 月	国外
REFRACTION CONTRAST IMAGING VIA LASER- COMPTON X-RAY USING OPTICAL STORAGE CAVITY (口 頭)	K. Sakaue, T. Aoki, M. Washio, M. Fukuda, Y. Honda, N. Terunuma, J. Urakawa	IPAC2012, WEOBB02, New Orleans, US	2012 年 5 月	国外
Development of an RF Electron Gun for Ultra-Short Bunch Generation (ポスター)	Yuya Koshiba, Tatsuro Aoki, Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Junji Urakawa, Toshikazu Takatomi	IPAC2012, TUPPD058, New Orleans, USA	2012 年 5 月	国外
Gamma-rays Generation with 3D 4-mirror Cavity for ILC Polarized Positron Source (ポスター)	T. Akagi, R. Tanaka, T. Takahashi, H. Yoshitama, S. Araki, J. Urakawa, T. Omori, T. Okugi, H. Shimizu, N. Terunuma, Y. Funakoshi, Y. Honda, K. Sakaue, M. Washio	IPAC12, WEPPD055, New Orleans	2012 年 5 月	国外
Femtosecond electron guns for ultrafast electron diffraction (口頭)	J. Yang, N. Naruse, K.Kan, T. Kondoh, Y. Yoshida, K. Tanimura, J. Urakawa	IPAC12, FRXBB01, New Orleans	2012年5月	国外
Feasibility of THz source based on coherent Smith-Purcell radiation generated by femtosecond electron bunches in super-radiant regime (π° $\pi \not \rightarrow -$)	L. G. Sukhikh, A. P. Potulitsyn, K. P. Artyomov, A. S. Aryshev, J. Urakawa, P. V. Karataev	IPAC2012, MOPPP005, New Orleans, USA	2012 年 5 月	国外
Further study on fast cooling Compton storage rings (ポスター)	E. Bulyak, J. Urakawa, F. Zimmermann	IPAC2012, MOPPP004, New Orleans, USA	2012年5月	国外
Permanent Magnet Focusing System for Klystrons (ポスター)	Y. Fuwa, Y. Iwashita, H. Tongu, S. Fukuda,	IPAC2012, THPPC055, New Orleans, USA	2012年5月	国外
Applications of a high finesse Fabry Perot Cavity for the ILC (口頭)	R. Tanaka, T. Akagi, T. Takahashi, H. Yoshitama, S. Araki, J. Urakawa, T. Omori, T. Okugi, H. Shimizu, N. Terunuma, Y. Funakoshi, Y. Honda, K. Sakaue, M. Washio	TYL2012 クレモンドーグラン	2012 年 5 月	国外
STF 加速器のコミッショニング (口頭)	渡邊謙、他 55 名	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果(発表題目、口頭・ 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
KEK-STF におけるLバンド9 セル空洞の性能試験の最新結果 (口頭)	山本康史、加古永治、宍戸寿郎、 野口修一、早野仁司、渡邉謙	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
異方性フェライトを用いたクラ イストロン用集束磁石システム (口頭)	不破 康裕、池田 英樹、北原 龍 之介、那須 裕司、頓宮 拓、岩下 芳久(京大化研)、道園 真一郎、 福田 茂樹(KEK)	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
電子陽電子リニアコライダー用 加速空洞の研究開発(ロ頭)	上野健治	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A FREQUENCY SCAN-BASED AND A BEAM-BASED CALIBRATION METHOD FOR THE LLRF SYSTEMS AT KEK STF $(\# \neg \neg \not \neg \neg)$	Mathieu Omet, Ayaka Kuramoto (Sokendai), Hitoshi Hayano, Toshihiro Matsumoto, Shinichiro Michizono, Ken Watanabe (KEK)	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
RF 電子銃中における Cs ₂ Te フォ トカソードからの 1ms パルス生 成 (ポスター)	細田 誠一、栗木 雅夫、飯島 北 斗(広島大学大学院先端物質科 学研究科)、浦川 順治、早野 仁 司、渡邉 謙(高エネルギー加速 器研究機構)	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
L バンドフォトカソード RF 電 子銃の開発(VI)(ポスター)	川瀬 啓悟、加藤 龍好、入澤 明典、 藤本 將輝、上司 文善、大角 寛樹、 矢口 雅貴、磯山 悟朗(阪大産 研)、渡邉 謙、早野 仁司、浦川 順治、高富 俊和(高工研)、栗 木 雅夫(広島大院先端研)、柏 木 茂(東北大電子光)	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
STF における超伝導空洞 HOM を利用した空洞アライメントの 検出 (ポスター)	倉本 綾佳 (総合研究大学院大 学)、早野 仁司、渡邉 謙 (高エ ネルギー加速器研究機構)	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
KEK-STF における量子ビーム実 験のためのキャプチャークライ オモジュールの建設とヒーム運 転(ポスター)	山本康史、他	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
超伝導空胴アイリス部における X線検出システムの開発(ポス ター)	頓宮 拓、岩下 芳久(京大化研)、 早野 仁司、山本 康史(高エネル ギー加速器研究機構)	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
STF の現状(ポスター)	早野仁司、他	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
KEK-STF 量子ビーム実験におけ る高周波源(ポスター)	松本 利広、荒川 大、明本 光生、 片桐 広明、設楽 哲夫、竹中 た てる、中尾 克己、中島 啓光、福 田 茂樹、本間 博幸、松下 秀樹、 三浦 孝子、矢野 喜治、道園 真 一郎(高エネ研)、Omet Mathieu (総研大)	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果(発表題目、口頭・ 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
量子ビーム STF 衝突実験におけ るレーザー蓄積装置の開発(ポ スター)	清水 洋孝、Alexander Aryshev(高 エネルギー加速器研究機構 ATF)、東 保男、本田 洋介、浦 川 順治(高エネルギー加速器研 究機構)	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
RF 電子銃を用いた MeV 超高圧 電子顕微鏡の開発(ポスター)	楊 金峰、菅 晃一、成瀬 延康、 近藤 孝文、吉田 陽一、谷村 克己、 浦川 順治	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
3 次元4 枚鏡レーザー蓄積共振 器を用いたガンマ線生成実験共 振器制御システムの開発(口頭)	田中 龍太、赤木 智哉、栗木 雅夫、 高橋 徹、吉玉 仁、荒木 栄、浦 川 順治、大森 恒彦、奥木 敏行、 清水 洋孝、照沼 信浩、舟橋 義聖、 本田洋介、坂上和之、鷲尾 方一	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
3 次元4 枚鏡レーザー蓄積共振 器を用いたガンマ線生成実験 - マルチバンチガンマ線生成(口 頭)	赤木 智哉、栗木 雅夫、高橋 徹、 田中 龍太、吉玉 仁、荒木 栄、 浦川順治、大森 恒彦、奥木 敏行、 清水 洋孝、照沼 信浩、舟橋 義聖、 本田洋介、坂上和之、鷲尾 方一	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
光ファイバーを用いた高精度基 準信号伝送システムの開発(II) (ポスター)	内藤 孝、浦川 順治、照沼 信浩、 海老原 清一、野澤 俊介、雨宮 正樹、鈴山 智也、渡部 兼一	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
KEK 先端加速器試験装置 (ATF) におけるアライメントの復旧 (ポスター)	荒木 栄、奥木 敏行、浦川 順治、 久保 浄、黒田 茂、田内 利明、 照沼 信浩、内藤 孝	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
次世代小型高輝度光子ビーム源 のためのデジタルフィードバッ クシステムの開発(ポスター)	吉玉仁、赤城智哉、栗木雅夫、 高橋 徹、田中 龍太、荒木 栄、 浦川順治、大森恒彦、奥木敏行、 清水洋孝、照沼信浩、舟橋義聖、 本田洋介、坂上和之、鷲尾方一	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
Compact Four Mirror Pulsed Laser Wire System for Quick Measurement of Electron Beam Profile (ポスター)	Arpit Rawankar, Hirotaka Shimizu, Junji Urakawa, Yousuke Honda, Masafumi Fukuda, Alexander Aryshev, You Yan, Tomoya Akagi, Kazuyuki Sakaue, Sakae Araki, Nobuhiro Terunuma	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
KEK 小型電子加速器 (LUCX) アップグレード計画 (1) (ポス ター)	福田将史、Aryshev Alexander、 荒木栄、本田洋介、坂上和之、 照沼信浩、浦川順治、鷲尾方一	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
KEK 小型電子加速器 (LUCX) アップグレード計画 (2) (ポス ター)	坂上和之、鷲尾方一、福田将史、 荒木栄、Aryshev Alexander、浦 川順治、照沼信浩、本田洋介	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
極短バンチ生成用光陰極高周波 電子銃開発(ポスター)	坂上和之、小柴裕也、水柿将貴、 鷲尾方一、高富俊和、浦川順治、 黒田隆之助	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
極短バンチ電子ビームの時間構 造計測用 RF-Deflector の設計 (ポ スター)	西村祐一、坂上和之、高橋猛之 進、鷲尾方一	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果(発表題目、口頭・ 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
早稲田大学フォトカソード RF- Gun システムと応用研究の現状 報告 (ポスター)	川內洋平、保坂勇志、坂上和之、 坂本瑞樹、山本隆之、吉田靖史、 浦川順治、照沼信浩、早野仁司、 柏木茂、黒田隆之助、鷲尾方一	第9回日本加速器学会年会、 大阪大学	2012 年 8 月	国内
Progress of SOI Pixel Process (口頭)	Y. ARAI	International Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging (PIXEL2012), 猪苗 代町	2012 年 9 月	国内
High-Resolution Monolithic Pixel Detectors in SOI Technology (口頭)	T. MIYOSHI, Y. ARAI, I. M. AHMED, P. KAPUSTA, R. ICHIMIYA, Y. IKEMOTO, Y. FUJITA, K. TAUCHI, A. TAKEDA,	International Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging (PIXEL2013), 猪苗 代町	2012 年 9 月	国内
High Resolution X-ray Imaging Sensor with SOI Technology $(\pi^2 \land \beta -)$	A. TAKEDA, Y. ARAI, T. MIYOSHI, M. OKIHARA, H. KASAI, N. MIURA, N. KURIYAMA, Y. NAGATOMO	International Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging (PIXEL2014), 猪苗 代町	2012 年 9 月	国内
Advanced Radiation Image Sensors with SOI technology (口頭)	Y. ARAI	International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2012), 京 都市	2012 年 9 月	国内
ILC 偏極陽電子源の為のレーザ ー蓄積共振器の開発(口頭)	田中 龍太、赤木 智哉、荒木 栄、 浦川順治、大森 恒彦、奥木 敏行、 栗木 雅夫、坂上 和之、清水 洋孝、 高橋 徹、照沼 信浩、舟橋 義聖、 本田 洋介、吉玉 仁、鷲尾 方一	日本物理学会 2012 年秋季大会 京都市	2012 年 9 月	国内
次世代小型高輝度光子ビーム源 のためのデジタルフィードバッ クシステムの開発(ロ頭)	吉玉 仁、赤木 智哉、荒木 栄、 浦川順治、大森 恒彦、奥木 敏行、 片岡裕美、栗木 雅夫、坂上 和之、 清水 洋孝、高橋 徹、田中 龍太、 照沼 信浩、舟橋 義聖、本田 洋介、 鷲尾 方一	日本物理学会 2012 年秋季大会、京都市	2012 年 9 月	国内
SOI 技術による高精細 X 線イメ ージセンサーの開発(口頭)	三好敏喜、新井康夫、池本由希 子、一宮亮、田内一弥、武田彩希、 藤田陽一、他 SOIPIX グループ	日本物理学会 2012 年秋 季大会、横浜市	2012年9月	国内
Experiment of the 4-Mirror Compton cavity at KEK-ATF (口頭)	R. Tanaka, T. Akagi, T. Takahashi, H. Yoshitama, S. Araki, J. Urakawa, T. Omori, T. Okugi, H. Shimizu, N. Terunuma, Y. Funakoshi, Y. Honda, K. Sakaue, M. Washio	POSIPOL2012 ドイツ ゾイツェン	2012年9月	国外
Recent progress for 4-Mirror Compton cavity at KEK (口頭)	J. Urakawa	POSIPOL2012 ドイツ ゾイツェン	2012年9月	国外
1 ms Multi-bunch Electron Beam Acceleration by a Normal Conducting RF Gun and Superconducting Accelerator (口頭)	M. Kuriki, H. Iijima, S. Hosoda, K. Kawase, G. Isoyama, R. Kato, K. Watanabe, H. Hayano, J. Urakawa, A. Kuramoto, S. Kashiwagi, K. Sakaue	MOPB025, 16th Linac 2012, 9-14 September, Tel-Aviv, Israel	2012 年 9 月	国外

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果(発表題目、口頭・ 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
X-Ray Detection Using SOI Monolithic Sensors at a Compact High-Brightness X-Ray Source Based on Inverse Compton Scattering (口頭)	T. Miyoshi, Y. Arai, M. Fukuda, J. Haba, H. Hayano, Y. Honda, K. Sakaue, H. Shimizu, A. Takeda, J. Urakawa, K. Watanabe	2012 IEEE Nuclear Science Symposium Anaheim, CA, 米国	2012年11月	国外
Monolithic pixel detectors with 0.2 um FD-SOI pixel process technology (口頭)	T. MIYOSHI, Y. ARAI, Y. IKEMOTO, Y. UNNO, Y. IKEGAMI, R. ICHIMIYA, Y. FUJITA, K. TAUCHI, T. TSUBOYAMA, A. TAKEDA, T. TSURU, S. NAKASHIMA, G. S. RYU, T. KOHRIKI	13th Vienna Conference on Instrumentation (VCI2013), ウィーン、オーストリア	2013 年 2 月	国外
Feedback R&D for Optical Cavity (口頭)	R. Tanaka, T. Akagi, T. Takahashi, H. Yoshitama, S. Araki, J. Urakawa, T. Omori, T. Okugi, H. Shimizu, N. Terunuma, Y. Funakoshi, Y. Honda, K. Sakaue, M. Washio	SAPPHiRE DAY、ジュネー ブ	2013 年 2 月	国外
FZ および 2 重 SOI ウエハを用い た放射線ピクセル検出器の特性 評価(口頭)	三好 敏喜、新井 康夫、池本 由 希子、武田 彩希、他 SOIPIX グ ループ	日本物理学会、第68回年 次大会、東広島市	2013年3月	国内
2 層埋込酸化膜構造をもつ SOI ピクセル検出器の TID 放射線耐 性の評価(口頭)	本多 俊介、原 和彦、石橋 貴生、 新井 康夫、三好 敏喜、大野 守 史、鶴 剛、初井 宇記、沖原 将 生、三浦 規之、葛西 大樹、他 SOIPIX グループ	日本物理学会、第68回年 次大会、東広島市	2013 年 3 月	国内
SOI ピクセル検出器の開発(口 頭)	初井 宇記	日本物理学会、第68回年 次大会、東広島市	2013年3月	国内
極短バンチ生成用高周波電子銃 の開発(口頭)	水柿 将貴、坂上 和之、小柴 裕也、 黒田 隆之助、平 義隆、熊木 雅史、 浦川 順治、高富 俊和	日本物理学会、第68回年 次大会、東広島市	2013年3月	国内
電子ビームの時間構造計測用 2 cell RF-Deflector の研究(口頭)	西村 祐一、高橋 猛之進、坂上 和之、鷲尾 方一、高富 俊和、浦 川 順治	日本物理学会、第68回年 次大会、東広島市	2013年3月	国内
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 (12) (口頭)	福田将史、荒木栄、Aryshev Alexander、浦川順治、坂上和之、 照沼信浩、本田洋介、鷲尾方一	日本物理学会、第68回年 次大会、東広島市	2013年3月	国内
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 (13) (口頭)	坂上和之、荒木栄、Aryshev Alexander、浦川順治、照沼信浩、 福田将史、本田洋介、鷲尾方一	日本物理学会、第68回年 次大会、東広島市	2013年3月	国内
偏極陽電子源の為のレーザーコ ンプトン散乱によるガンマ線生 成実験(ロ頭)	田中 龍太、赤木 智哉、荒木 栄、 浦川 順治、大森 恒彦、奥木 敏行、 栗木 雅夫、坂上 和之、清水 洋孝、 高橋 徹、照沼 信浩、舟橋 義聖、 本田 洋介、吉玉仁、鷲尾 方一	日本物理学会、第68回年 次大会、東広島市	2013年3月	国内
レーザー Compton 散乱による光 子ビーム生成実験へのデジタル 制御システムの組み込み(口頭)	吉玉 仁、赤木 智哉、荒木 栄、 浦川 順治、大森 恒彦、奥木 敏行、 栗木 雅夫、坂上 和之、清水 洋孝、 高橋 徹、田中 龍太、照沼 信浩、 舟橋 義聖、本田洋介、鷲尾 方一	日本物理学会、第68回年 次大会、東広島市	2013 年 3 月	国内

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

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	国内・ 外の別
L-band 常伝導 RF 電子銃による lms パルス長電子ビームの生成	渡邉 謙、早野 仁司、浦川 順治、 松本 利広、福田 将史、栗木 雅夫、 飯島 北斗、坂上 和之、倉本 綾佳、 Mathieu OMET	日本加速器学会誌、Vol.9、 No.2、「加速器」	2012 年 7 月 掲載	国内
KEK におけるレーザーコンプト ン散乱を用いた小型 X 線源の開 発の現状とアップグレード計画	福田将史、Aryshev Alexander、 荒木栄、本田洋介、坂上和之、 照沼信浩、浦川順治、鷲尾方一	日本加速器学会誌、Vol.9、 No.3、156-164「加速器」	2012 年 10 月 掲載	国内
Measurement of beam waist for an optical cavity based on Gouy phase	Yan You, Junji Urakawa, Arpit Rawankar, `Alexander Aryshev, Hirotaka Shimizu, Yosuke Honda, Lixin Yan, Wenhui Huang, Chuanxiang Tang	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 694 (2012) 6–10	2012 年 12 月 掲載	国外
First refraction contrast imaging via Laser-Compton Scattering X-ray at KEK	Kazuyuki Sakaue et al.	AIP Conf. Proc. 1466, 272	2012 年 12 月 掲載	国外
次世代レーザーコンプトン散乱 ガンマ線源とその利用	秋宗 秀俊、字都宮 弘章、浦川 順治、大垣 英明、大熊 春夫、大 塚 孝治、梶野 敏貴、加藤 政博、 紀井 俊輝、James Koga、坂井 信 彦、静間 敏行、嶋 達志、豊川 弘之、西尾 勝久、早川 岳人、羽 島良一、藤原 守、宮本 修治	ISSN 1342-3185, IAE- RR-2013 No.101, 1-154	2013 年 1 月 掲載	国内
Design studies on compact four mirror laser resonator with mode- locked pulsed laser for 5 um laser wire	Arpit Rawankar, Junji Urakawa, Hirotaka Shimizu, Yan You, Nobuhiro Terunuma, Alexander Aryshev, Yosuke Honda	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 700 (2013) 145–152	2013年1月 掲載	国外
Design and Evaluation of a SOI Pixel Sensor for X-ray Trigger- driven Readout	Ayaki Takeda, Yasuo Arai, Syukyo Gando Ryu, Shinya Nakashima, Takeshi Go Tsuru, Toshifumi Imamura, Takafumi Ohmoto, and Atsushi Iwata	IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL PP, Issue 99, 2013, Digital Object Identifier: 10.1109. TNS.2012.2225072	2013 年 1 月	国外
電子線形加速器の電子ビームの 高強度化	浦川 順治	Isotope News、2013 年 2 月 号、No.706、2-7	2013 年 2 月 掲載	国内
1 ms Pulse Beam Generation and Acceleration by Photo-cathode RF gun and Super-conducting Accelerator	M. Kuriki, H. Iijima, S. Hosoda, K. Watanabe, H. Hayano, J. Urakawa, G. Isoyama, Ryukou Kato, K. Kawase, A. Kuramoto, S. Kashiwagi, K. Sakaue	Jap. Jour. of App. Phys.	2013 年 2 月 受付	国内
Tests With Soft X-rays of an Improved Monolithic SOI Active Pixel Sensor	Ryu, S. G.; Tsuru, T. G.; Prigozhin, G.; Kissel, S.; Bautz, M.; LaMarr, B.; Nakashima, S.; Foster, R. F.; Takeda, A.; Arai, Y.; Imamura, T.; Ohmoto, T.; Iwata, A.	IEEE Transactions on Volume 60, Issue 1, Part 2, Digital Object Identifier: 10.1109.TNS.2012.2231880, Publication Year: 2013, Page(s): 465 - 469	2013 年 2 月	国外