平成２３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２４年８月６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 23 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。

目　　次

1．委託事業の目的…… 1

2．平成 23 年度の事業計画 …… 1

3．実施体制と役割分担…… 4

4．委員会…… 6

5．平成 23 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 …… 9

B.　**カソード、RF Gun 開発**　広大：栗木研
大強度高品質電子源開発…… 12

C.　**高圧 DC Gun 開発と入射部超伝導空洞開発**
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…… 19
C-2. 直流高圧電子源開発…… 26
C-3. CW 超伝導加速空洞研究開発 …… 34

D.　**パルスレーザー蓄積装置開発**　広大：高橋研
パルスレーザー蓄積装置開発…… 40

E.　**パルス超伝導空洞開発**　KEK：早野グループ
パルス超伝導加速空洞技術の開発…… 48

F.　**CW 超伝導空洞開発**　KEK：古屋グループ
CW 超伝導加速空洞技術の開発 …… 58

G.　**高周波超伝導空洞用入力カプラーの開発**　東大：中村研
高周波超伝導空洞用入力カプラーの開発…… 67

H.　**小型 1.3GHz 高周波源開発**　KEK：福田グループ
小型 1.3GHz 高周波源開発 …… 75

I.　**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 …… 78

J.　**X 線測定および利用研究**　早稲田大：鷲尾研
X 線測定および利用研究 …… 81

K.　**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：照沼グループ、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 …… 92

1．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 5nm ～ 0.025nm 波長領域の小型高輝度 X 線発生装置の開発とその実用化に必要な基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 ～ 750kV 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 23 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）

750kV 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

2008 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

パルス運転用超伝導加速空洞製作技術を高度化するために、表面処理条件を工夫した超伝導空洞を試作して、その性能測定を系統的に行うことによって、高性能超伝導空洞製作が行える条件を調べる。2008 年度、超伝導加速空洞製作に関する表面処理方法の有用な知見を得たので、製作コスト削減に向けた空洞製作を行う。この空洞製作技術の系統的な開発研究を 2008 年から 2010 年まで行うことによって、パルス超伝導加速空洞の製品化の見通しを得るのが目的であるが、2009 年度は 2 空洞の製作を開始する。2010 年度に 2 空洞の性能を確認して超伝導加速システムを完成さる計画であるが、その性能試験を電子ビーム加速によって行える環境を整備する。また、製作コスト削減方法の検討資料を作成する。

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。この空洞製作技術の系統的な開発研究を 2009 年から 2011 年まで行うことによって、CW 超伝導加速空洞の製品化の見通しを得るのが目的であるが、2009 年度は超伝導空洞モジュールの試作に向けて具体的な検討を行う。また、2008 年度に日本原子力研究開発機構と連携して試作した直流高圧電子源と組み合わせて使用する CW 超伝導加速空洞の空洞試験の準備を整える。

G. 高周波超伝導空洞用入力カプラーのためのセラミック窓の開発

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

オモジュール内の真空中にて設置されることとなるため、セラミック窓等は断熱槽で覆い、なおかつ低温状態を保持することが重要であり、最終的にはその状況下におけるセラミック窓の基本性能を評価する。

H. 小型 1.3GHz 高周波源開発

安定な高周波源であるクライストロンを低電圧駆動・三極管化・マルチビームクライストロンの技術を使って小型化設計を試みる。また、エネルギー回収型コレクターでさらに省エネルギー化を計った装置設計を行う。モジュレータ電源の小型化も行い、システムの小型化、省エネルギー化を実現し、製品システム化がスムーズに行えるように高信頼性化を目指す。2009 年度は試験装置の部品製作を行う。また、2010 年度に本試験装置を組み立て、必要な性能試験を行えるように準備する。そして 2011 年度に実用試験装置を製作する予定である。

I. X 線検出装置の実用化開発

軟 X 線から硬 X 線検出装置の評価を行い、本課題装置に利用する場合の問題点を抽出する。X 線検出装置を試作して、X 線測定実験を行い、どのような測定上の問題があるかを整理する。2009 年度は、軟X線検出装置の性能を調べる。

J. X 線の検出装置（時間分解及び空間分解）の設計及び試作を実施する

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

K. 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

高周波電子源を使って、今までの 300nC/300nsec 電子ビーム生成実績を向上するために、新しい電子源を製作する。また、5MeV 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 線生成実験を行えるように装置を改造する。2009 年度に 3 次元 4 枚ミラーリング光蓄積装置を試作する。この光蓄積装置で 2010 年度に生成軟X線を使った実用試験を行えるように、実験装置の改造を進める。2008 年～ 2010 年間で電子ビーム・レーザー衝突実験によって、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ために、2009 年度も基礎実験を行う。

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・調整に当たる。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努力する。

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するので、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、2011 年度までに 500 ～ 750kV 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。

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。

３．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、東カウンターホール	加速器研究施設　教授 古屋　貴章
②電子ビーム・レーザー衝突技術の開発（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小型高信頼性 L-band 高周波源開発	同、超伝導リニアック試験棟（STF）	加速器研究施設　教授 福田　茂樹
⑤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
①新フォトカソード開発	茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22 工学系研究科原子力専攻	工学系研究科原子力専攻　教授 上坂　充
②高周波超伝導空洞用入力カプラーのためのセラミック窓の開発	千葉県柏市柏の葉５－１－５ 東京大学物性研究所	物性研究所　准教授 中村　典雄

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 広島大学大学院先端物質科学研究科	大学院先端物質科学研究科　准教授 高橋　徹
②大強度高品質電子源の開発	東広島市鏡山１－３－１ 広島大学大学院先端物質科学研究科	大学院先端物質科学研究科　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 (2)直流高圧電子源と組み合わせて使用するCW超伝導加速空洞の研究開発	茨城県那珂郡東海村白方白根2-22 日本原子力研究開発機構	羽島　良一 永井　良治 西森　信行 飯島　北斗（平成21年6月30日まで） 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ＤＣ電子源開発	東京都港区西新橋一丁目24番14号 株式会社日立ハイテクノロジーズ、研究開発本部	主管技師・小瀬　洋一

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

①汎用ブラッグ反射を用いたスペクトロメータシステム開発

②高分解能半導体X線スペクトロメータ

③円筒面多層膜ミラーと二次元位置検出器を組み合わせた２次元スペクトロメータ

業　務　項　目	実　施　場　所	担　当　責　任　者
X線検出器の開発	東京都新宿区大久保３丁目４番１号 学校法人　早稲田大学	理工学術院　教授 鷲尾　方一

４．委員会・会議・打合せ・研究会

研究会

2012.01.24　　第１回共同レーザー開発打合せ（KEK-LC コンテナ）
2012.03.08 ～ 09　　第９回高輝度・高周波電子銃研究会（KEK ３号館１階会議室）

STF 量子ビーム打合せ

2011.04.06　KEK 1 号館談話室
2011.04.20　KEK 1 号館談話室
2011.05.11　KEK 1 号館談話室
2011.05.25　KEK 1 号館談話室
2011.06.08　KEK 1 号館談話室
2011.06.22　KEK 1 号館談話室
2011.07.06　KEK 1 号館談話室
2011.07.20　KEK 1 号館談話室
2011.09.14　KEK 1 号館談話室
2011.10.05　KEK 1 号館談話室
2011.10.19　KEK 1 号館談話室
2011.11.02　KEK 1 号館談話室
2011.11.16　KEK 1 号館談話室
2011.11.30　KEK 1 号館談話室
2011.12.14　KEK 1 号館談話室
2011.12.28　KEK 1 号館談話室
2012.01.11　KEK 1 号館談話室
2012.01.25　KEK 1 号館談話室
2012.02.08　KEK 1 号館談話室
2012.02.22　KEK 1 号館談話室
2012.03.07　KEK 1 号館談話室
2012.03.21　KEK 1 号館談話室

定例レーザー蓄積技術打ち合わせ

2011.05.27　量子ビームレーザー打ち合わせ　広島大学先端研 405N
2011.07.28　量子ビームレーザー打ち合わせ　早稲田大学 55 号館 4F
2011.10.19　量子ビームレーザー打ち合わせ　KEK1 号館談話室 2
2011.12.21　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

2011.04.07　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.04.14　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.04.21　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ

2011.04.28　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.05.12　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.05.19　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.05.26　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.06.02　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.06.09　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.06.16　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.06.23　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.06.30　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.07.14　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.07.21　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.07.28　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.08.04　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.08.11　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.09.01　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.09.16　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.09.22　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.10.13　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.11.03　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.11.10　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.11.17　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.11.24　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2011.12.22　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2012.01.05　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2012.01.12　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2012.01.19　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2012.01.26　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2012.02.16　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2012.02.23　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2012.03.15　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2012.03.22　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ
2012.03.29　小型Ｘ線源実験打ち合わせ（LUCX meeting）KEK-LC コンテナ

定例電子銃打ち合わせ

2011.04.14　3.5 cell RF-gun, 12 cell Booster Meeting
2011.04.28　3.5 cell RF-gun, 12 cell Booster Meeting
2011.05.26　3.5 cell RF-gun, 12 cell Booster Meeting
2011.07.21　3.5 cell RF-gun, 12 cell Booster Meeting
2011.11.08　3.5 cell RF-gun, 12 cell Booster Meeting
2012.02.17　12 cell Booster Meeting

定例 L-band RF 電子銃開発グループ会合

2011.04.13　第 29 回 L-band RF 電子銃開発グループ会合（ビデオ会議およびウエブ会議接続）
2011.05.10　第 30 回 L-band RF 電子銃開発グループ会合（ビデオ会議およびウエブ会議接続）
2011.06.21　第 31 回 L-band RF 電子銃開発グループ会合（ビデオ会議およびウエブ会議接続）
2011.07.22　第 32 回 L-band RF 電子銃開発グループ会合（ビデオ会議およびウエブ会議接続）
2011.09.12　第 33 回 L-band RF 電子銃開発グループ会合（ビデオ会議およびウエブ会議接続）
2011.10.11　第 34 回 L-band RF 電子銃開発グループ会合（ビデオ会議およびウエブ会議接続）
2011.11.15　第 35 回 L-band RF 電子銃開発グループ会合（ビデオ会議およびウエブ会議接続）
2011.12.20　第 36 回 L-band RF 電子銃開発グループ会合（ビデオ会議およびウエブ会議接続）
2012.01.24　第 37 回 L-band RF 電子銃開発グループ会合（ビデオ会議およびウエブ会議接続）
2012.02.22　第 38 回 L-band RF 電子銃開発グループ会合（ビデオ会議およびウエブ会議接続）
2012.03.22　第 39 回 L-band RF 電子銃開発グループ会合（ビデオ会議およびウエブ会議接続）

高輝度電子源開発グループ会合

2011.05.20　第 32 回高輝度電子源開発グループ会合（ウエブ会議接続）
2011.06.17　第 33 回高輝度電子源開発グループ会合（ウエブ会議接続）
2011.08.01　第 34 回高輝度電子源開発グループ会合（日本加速器学会インフォーマルミーティング）
2011.09.14　第 35 回高輝度電子源開発グループ会合（ウエブ会議接続）
2011.11.16　第 36 回高輝度電子源開発グループ会合（ウエブ会議接続）
2011.12.14　第 37 回高輝度電子源開発グループ会合（ウエブ会議接続）
2012.01.18　第 38 回高輝度電子源開発グループ会合（ウエブ会議接続）
2012.02.22　第 39 回高輝度電子源開発グループ会合（ウエブ会議接続）
2012.03.28　第 40 回高輝度電子源開発グループ会合（ウエブ会議接続）

5．平成 23 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

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されているレーザー駆動高輝度高周波電子源に関する研究開発が行われているが、（株）浜松ホトニクス製作の可視光駆動マルチアルカリ Na_2KSb 光陰極の活用から自主開発のフェーズに入っている。東日本大震災の影響で、東大電子ライナク・レーザー施設、光陰極成膜装置に大きな被害を受けた。研究メンバ全員でシステムの復旧を行い、研究開発を再開できる状態になった。日本原子力研究開発機構と共同でマルチアルカリ Na_2KSb の製作を行なっている。まず Cs_2Te の 2 元系で成膜装置を調整中である。

1. 本研究の背景

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 5nm ～ 0.025nm 波長領域の小型高輝度 X 線発生装置の開発とその実用化に必要な基幹技術の確立を行うことを目的とする。

さらに大強度安定化に必要な次の技術開発を行う。500 ～ 750kV 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線輝度を格段に高くすると同時に、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は共同で業務を行う。

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。

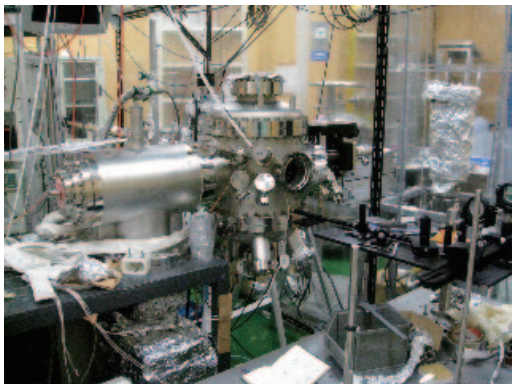
2. 新フォトカソード – 可視光カソード試運転

はじめに

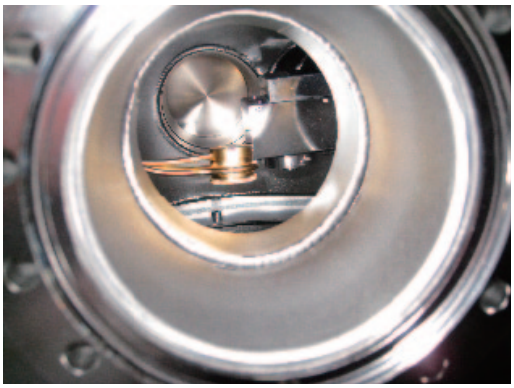
東京大学は平成 22 年度まで大学院工学系研究科原子力専攻ライナック研究施設 18MeV 電子線形加速器を利用し、可視光駆動フェムト秒パルスレーザーの高輝度電子源開発のために、（株）浜松ホトニクス製作のカートリッジ型 Na_2KSb, Cs_2Te カソードのビーム試験とマルチアルカリ光電面の研究開発を行ってきた。

平成 23 年度は、日本原子力研究開発機構 ERL グループの共同で、光電面自主製作の技術開発を開始した。

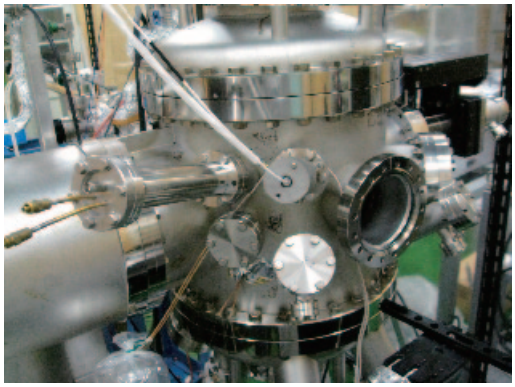
しかしながら、東日本大震災の影響で、東大電子ライナク・レーザー施設、光陰極成膜装置に大きな被害を受けた。研究メンバ全員でシステムの復旧を行い、研究開発を再開できる状態になった。MBE（Molecular Beam Epitaxy）成膜装置を、今年度導入した直線導入器、イオンポンプ制御装置を追加組み込みし。10^{-6}Pa 台の目的の真空度への到達を達成することができた。また、He ディテクターによるリークチェック、高真空対応のためのベーキング処理、各フランジトルク調整、K- セルによる分子線発生、レーザー照射による影響評価などを行った。



(a) MBE 装置外観：
中央が MBE 製膜装置本体、
右側円柱部分がサブリメーションポンプ部分



(b) 装置内部：
中央金色部分が膜厚計ヘッド、
中央右寄り銀色直方体部分がヒーターアッセンブリ



(c) MBE 製膜装置本体：
中央ポートがエクストラクションゲージ、
中央左側ポートが膜厚計導入ポート及びその冷却系

(d) クヌーセンセル外観：
Cs 及び Na 等のアルカリ原子ビームを超高真空中にて発生させる

(a) MBE 装置外観　(b) 装置内部
(c) MBE 装置本体　(d) クヌーセンセル外観
図 1　マルチアルカリ光陰極成膜用 MBE 装置の調整の様子

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、成膜装置調整、測定系調整、ヒーターアッセンブリ、クヌーセンセル等の設置調整等を行っている。

また、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膜厚計直線導入機構を設置した。2 元系の Cs_2Te 光電面について、MBE 装置にて成膜したマルチアルカリ半導体膜厚と量子効率の関係を、WE7000 PC ベース計測器（デジタル計測装置）等の活用して調査した。

3. 平成 24 年度の予定

現在、日本原子力研究開発機構 ERL グループ所有 MBE 装置の立ち上げを行っており、来年度は ERL グループと共同で高周波電子銃において駆動可能なアンチモンベースのフォトカソード開発を行う予定である。

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、神戸浩多（東京大学大学院工学系研究科原子力専攻）

参考文献（2011 年度中の発表および掲載論文）

[1] 中園祥央、三好邦博、上田徹、羽島良一、上坂充、「カートリッジ型高周波電子銃用 Na_2KSb 及び Cs_2Te 光陰極材料の研究開発」、第 8 回日本加速器学会年会、2011 年 8 月

[2] 中園祥央、室屋裕佐、上田徹、上坂充、「Na_2KSb マルチアルカリ光陰極の開発」、第 6 回先進原子力科学技術に関する連携重点研究討論会（原子力機構施設利用一般共同研究成果報告会、弥生研究会：原子力専攻施設共同利用成果報告会、中性子散乱研究施設・設備説明会）、2011 年 8 月

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

概　要

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

本課題ではレーザーコンプトン散乱による高輝度X線発生においてレーザーとともに重要な役割を果たす大強度の電子源開発に取り組む。システム全体の運転モードとしてパルスモード（パルス長1ms、繰返し5Hz）とCWモード（連続運転）が考えられている。電子ビームの平均電流において、CWモードはパルスモードに比べ600倍程度と有利であるが、技術的にはより挑戦的である。各々モードに最適な電子銃はRF電子銃とDC電子銃であり、段階的実証を念頭に双方の開発を進めている。

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

2. 光電陰極RF電子銃開発

本課題では加速高周波との同期、および1msという長いパルスでの運転を考慮し、駆動周波数としてL-band（1.3GHz）を選択した。現在、KEK、FNAL（Fermi National Laboratory, 米国）、大阪大学（研究協力機関）、広島大学が共同して、1.3GHzのL-band RF電子銃開発を進めている。

RF電子銃で高品質の電子ビームを生成するには、空洞内に高い電場を生成する必要がある。また、真空放電などをおこさずに安定して空洞内に電磁場を形成し、かつ空洞壁から発生する暗電流をビーム電流に比べて低く抑制する必要がある。暗電流は空洞壁から電界放出により発生するもので、表面をなるべく清浄に保ち、滑らかな表面を実現することで抑制される。2010年度に行なった一回目の大パワーRF入力試験では、最大入力RFパワー1.7MWの電源を使用し、暗電流の値は表面電場27.7MV/mという条件において285・Aであった。しかしこの値をFowler-Nordheimの式を用いて目標である40MV/mの表面電場まで外挿すると、予想される暗電流は10mA程度となり、加速ビーム電流である10mAとほぼ同等の値となる。暗電流はビーム損失により放射線を発生し、安全上問題で

あるとともに、X 線生成の際の測定のバックグラウンドとなるので、ビーム電流よりも充分に小さい値に抑制する必要がある。そこで 2010 年 12 月にエタノールによる空洞洗浄を実施した。さらに 2011 年 9 月から最大 RF 出力を 5.0MW へと増強して、大パワー RF を入力して電界放出のもととなる表面の不純物や微小突起などを取り除く RF プロセッシングを継続した。図 1 にその結果をしめす。横軸は最大電場、縦軸は暗電流の値である。▲が第一回目の RF プロセス後の測定結果、■がエタノール洗浄後、そして●と○はパワー増強後にプロセスした後の値である。この図からも明らかなように、エタノール洗浄により暗電流値はひと桁以上減少し、40MV/m の電場で予想される値は 500μA 程度まで減少している。さらに、より高い RF 電場でプロセッシングを行なった後の暗電流の値は 100 − 200μA 程度となっており、ビーム電流比にしておよそ 1 − 2% に抑制されている。このように暗電流をビーム電流に比べて充分に低く抑えるという目標を達成することができた。今後は X 線検出器測定により、この暗電流由来のバックグラウンドレベルの同定、より高い電場での運転を目指し、随時プロセスを続けていく。

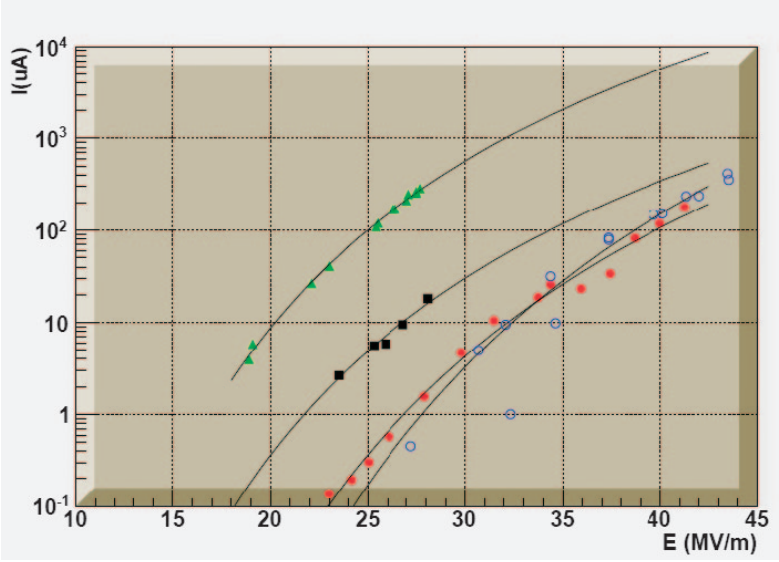


図 1　暗電流を RF 電子銃内部の最大電場の関数として表したもの。▲は各々一回目の RF プロセス、■は二回目の RF プロセス（エタノール洗浄後）、○、●は三回目の RF プロセス（RF パワー増強後）の結果を示めしている。曲線は Fower-Nordheim モデルによる理論曲線。

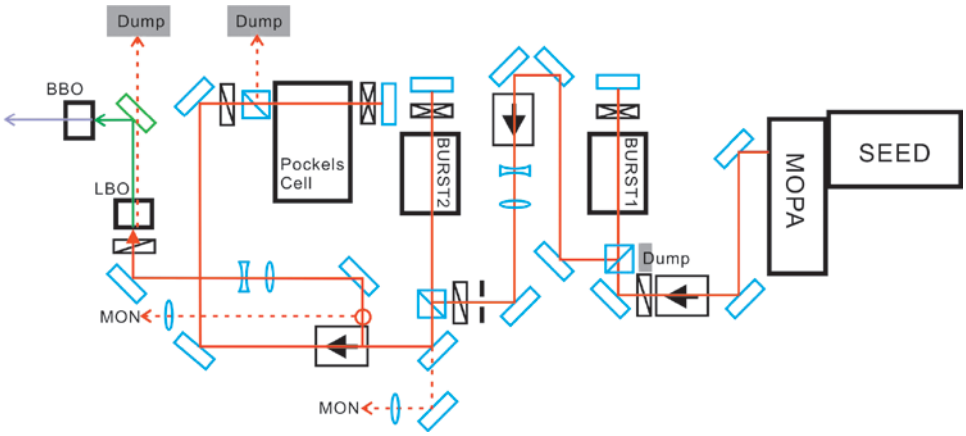


図 2　STF 量子ビームフォーマット用レーザーシステムのブロック図。SEED は Mode-lock laser をしめし、その出力を数段のアンプにより増幅した後、Pockels cell による 1ms 切り出し、LBO および BBO による高調波生成により UV パルス列を生成する。

STF における電子ビーム生成用のレーザーは、コライダーフォーマット（ILC 用 3.2nC, 2.7MHz 繰り返し）用のものを KEK、JINR(Joint Institute for Nuclear Research, ロシア)、IAP(Institute for Applied Physics, ロシア)、大阪大学、広島大学が共同で開発をすすめ、2010 年度に STF に設置され、試験運転により動作を確認している。量子ビームフォーマット（62pC, 162.5MHz 繰り返し）用のレーザーシステムは早稲田大学を中心に開発がすすめられた。図 2 にそのブロック図を示す。モードロックレーザーからの種光を数段のアンプにより増幅する MOPA(Master Oscillator Power Amplifier）方式により実現した。Nd:YVO_4 のモードロック光を Nd:YAG のアンプで増幅し、1064nm の 162.5MHz 繰り返しのパルス列を生成する。Pockels cel により 1ms パルスを切り出した後、LBO および BBO 複屈折非線形結晶を利用して、二倍波および四倍波の高調波を生成した。出力される UV 光は 266nm でおよそ 1.0μJ/bunch というエネルギーを達成しており、Cs_2Te フォトカソードの光電効果の量子効率を 0.5% とすると、およそ 1.0nC 程度の電子ビームが生成でき、目標を大きく超えた値を達成している。実際にはフィルターにより出力を減衰させ、ビーム電荷量をレーザー出力により調整している。

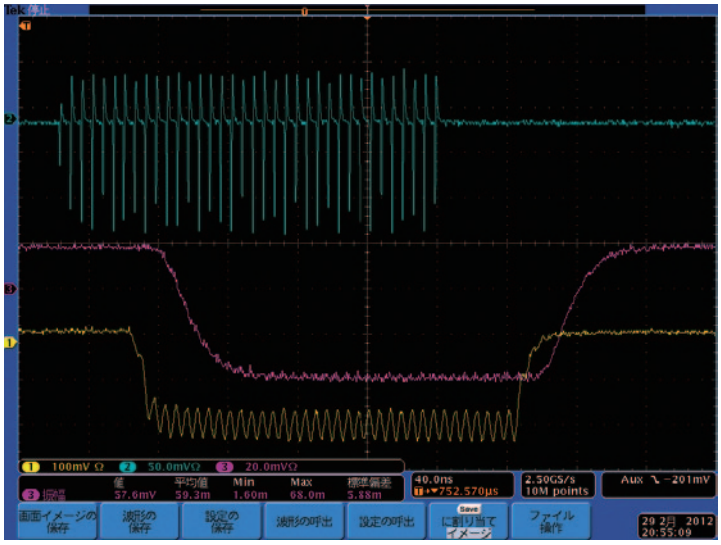


図 3　RF 電子銃により生成された電子ビーム信号の出力。上から BPM 生出力、ICT、BPM clipping 出力の各信号。複数のビーム計測機器に明瞭に電子ビームの信号が得られている。

RF 電子銃空洞のプロセス終了および量子ビーム用レーザーシステムの完成を受けて、ビーム生成の準備を進め、2011 年 2 月より試験を開始した。図 3 はビーム生成試験開始直後のビームモニターの出力である。試験初期はバンチ数を制限し一パルスあたり 30 バンチ程度に設定した。図 3 に示されているのは上から BPM（Beam Position Monitor）の出力、ICT（Integrated Current Transformer）の出力、BPM クリッピング信号の出力であり、いずれにも明瞭に電子ビームシグナルが観測されている。

短いパルス長における電子ビーム生成試験の成功を受けて、パルス長を伸ばしていき、ほどなくして 1ms のパルス生成に成功した。図 4 にその結果の一例をしめす。二つの波形のうち、上側がレーザー切り出しのためのゲート信号、下側が BPM の出力信号である。RF 位相、レーザーのパワープロファイル、RF フィードバックなどの調整の結果、1ms にわたりほぼ均一な電子ビーム列が得られていることがわかる。

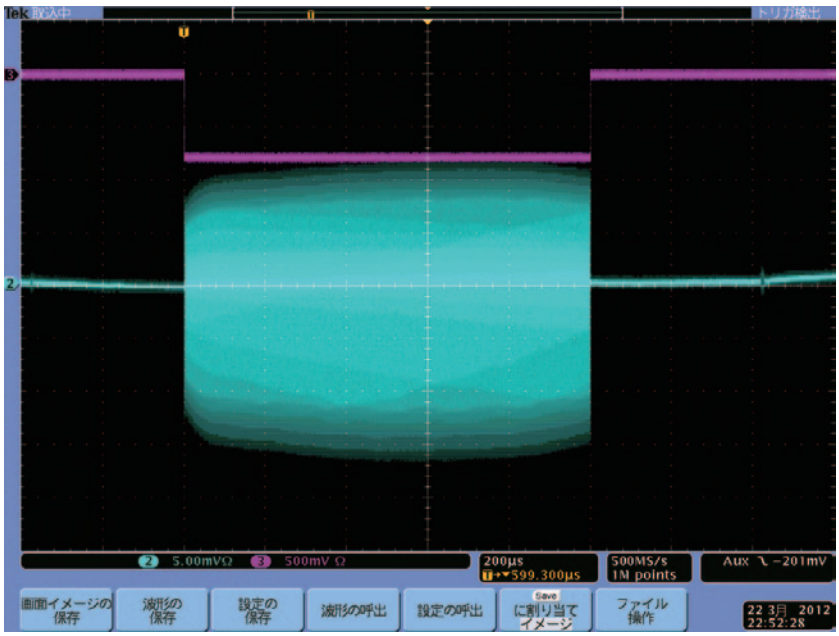


図４　1ms ビーム生成試験結果。上のパルスはレーザー切り出しゲート信号、下の帯状のものが BPM 出力信号。レーザーの切り出しパルスとほぼ等しい時間幅で電子ビームのパルス列が観測されている。この 1ms のパルスに 162450 個もの電子ビームバンチが含まれている。

以上のように、RF 電子銃による電子ビーム生成は予想以上に順調に進み、大きな成果を上げることができた。今後はビームエネルギー広がり、電子バンチ電荷の大きさや均一度、ビームエミッタンス等のビーム特性、またそれらの RF 周波数や RF 入力パワーへの依存性などのビーム特性についての詳しい理解、そしてより安定かつ高性能のビーム生成にむけて研究開発をすすめていく。

3. 光電陰極 DC 電子銃開発

本課題では前節で述べた RF 電子銃と平行して、RF 電子銃にくらべて数百倍の稼働率を持つ DC 型の光電陰極電子銃開発を行い、将来の実用化における飛躍的輝度の向上を意図している。広島大学グループでは、そのうち電子発生部である光陰極の性能向上に焦点をしぼりとりくんでいる。

負電子親和力（NEA）表面は、低エミッタンスで偏極した電子を発生できることからフォトカソードとして有用であるが、このカソードは表面への残留ガス吸着や電子ビーム引出しの際に起こるイオンバックボンバードメント

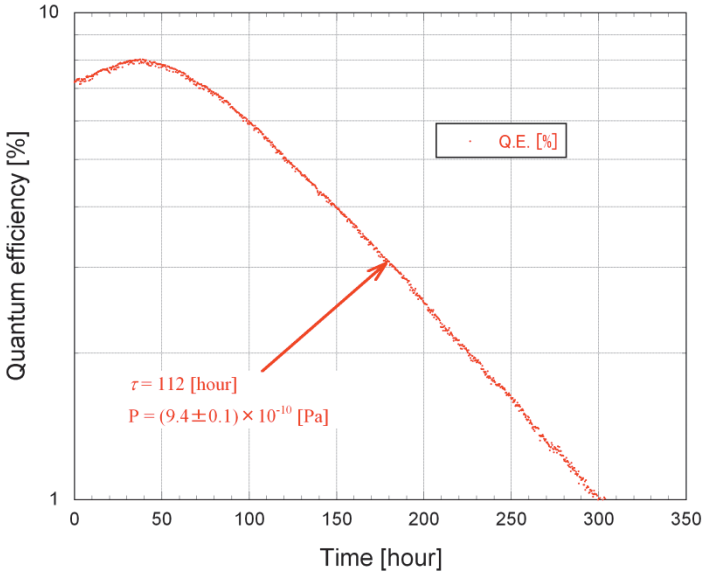


図５　新装置での寿命曲線。測定から求めた寿命は 112 時間。測定中の真空度は 9.4×10^{-10}Pa であった。

により量子効率が低下していくことが知られている。電子ビームの高輝度化、またカソードの長寿命化を目指すためには、こうした量子効率低下のメカニズムを詳細に調べる必要があり、広島大学では様々な条件で量子効率の変化を測定している。

これまでにカソード暗寿命の真空度依存性を測定しており、5×10^{-9}Pa の真空度で 100 ～ 200 時間の暗寿命を実現している。また、こうした測定から 1×10^{-9}Pa の真空度を達成できれば 1000 時間以上の暗寿命が得られることが解った。一方で、測定される寿命曲線は単純にその量子効率が劣化するのではなく、活性化直後はわりと急激に劣化するものの、その後量子効率が一定、またはやや回復する傾向が再現性をもって測定されてきた。この測定を行った装置は GaAs の加熱洗浄、NEA 活性化、寿命測定を同一真空容器内で行っており、活性化直後は Cs や O_2 がチェンバー内に残留している。このため寿命測定開始時は、この残留成分が量子効率に影響を与えているのではないかと考え、1×10^{-9}Pa 以下の真空度での長寿命の実証と、Cs/O の残留による効果のない状態での寿命測定を主な目的として新しい試験装置の開発を行ってきた。

本年度は目標であった真空度を上回る 9.5×10^{-10}Pa を達成し、現在本格的な測定を開始している。図 5 は新装置で測定した暗寿命曲線を示たものである。既存の装置を用いた測定では活性化直後に 8% だった量子効率が 10 時間程度で約 5% まで急激に低下していたが、新装置では、活性化チェンバーと測定チェンバーが分かれているため、先に述べた Cs/O の残留による効果はなく、急激な量子効率低下は見られない。しかし、両者とも緩やかな量子効率の上昇は観測されており、これは Cs/O の残留によるものではないことが分かった。また図 5 における寿命は 112 時間であるが、真空度が既存装置よりも良いにもかかわらず寿命が同程度である原因は今後検証していく。

量子効率劣化の原因となるガス吸着に関しては、昇温脱離法（Temperature Programmed Desorption; TPD）により NEA 表面に特有の分子吸着状態が形成されていることを昨年度までに見出していた。本年度はこの吸着分子を特定するために四重極質量分析計（Quadrupole Mass Spectrometer; QMS）を用いた TPD の実験を以下の様なサイクルで行った。まず、GaAs 試料の加熱洗浄を行った後、セシウムと酸素を用いて NEA 活性化を行う。その後 5×10^{-9} ～ 1×10^{-8}Pa（残留ガスは主に、H_2、H_2O、CO、Ar、CO_2）の真空中に数日間放置し、波長 633nm に対する量子効率が 1% 程度に低下した時点で表面分析を行った。昇温は 500 度程度まで行い、この温度を数十分保つこと

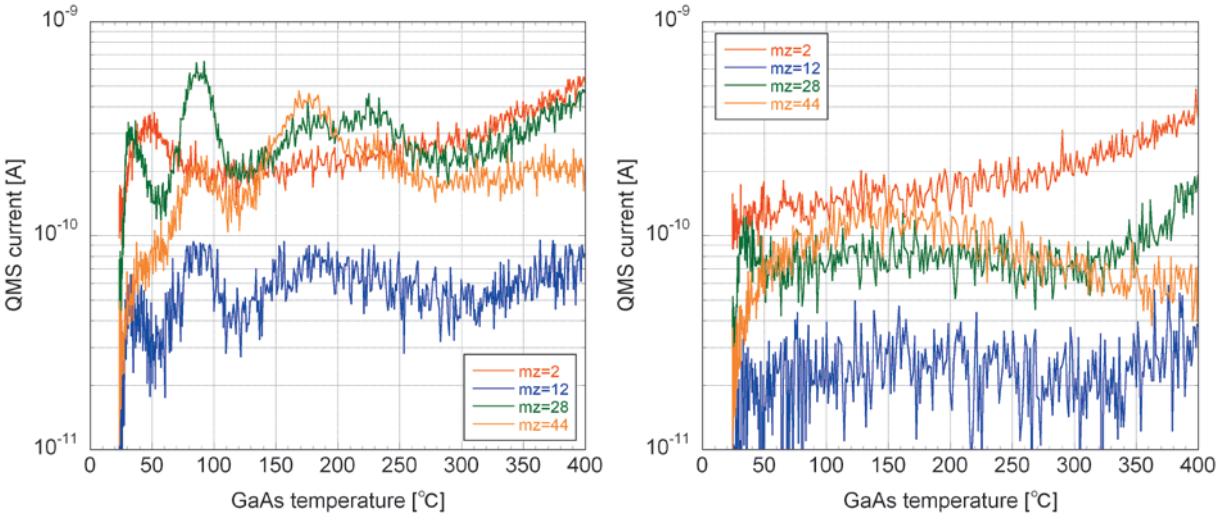


図 6　NEA 活性化をおこなった GaAs 試料からの TPD 曲線（左）と清浄表面からの TPD 曲線（右）。

で再度カソードの加熱洗浄を行う。これら一連のサイクルを複数回行い、得られる TPD カーブの再現性を確認した。今回の試験では TPD の昇温速度を 16K/min としている。また、比較のために、加熱洗浄のみで活性化を行わない清浄表面の GaAs を同程度の時間真空中に放置し、同じように脱離測定を行った。図 6 に量子効率が 10% から 0.9% まで劣化したカソードからの TPD 曲線（左）と清浄表面からの TPD 曲線（右）を示す。ここでは質量電荷比（m/z）2、12、28、44 をプロットしている。縦軸は QMS からの電流値を示し、分圧には変換していない。NEA 活性化を行った試料の量子効率が 0.9% まで低下するのに要した時間は活性化直後から 12 日間で、この間の真空度は平均で 6×10^{-9}Pa であった。清浄表面試料は加熱洗浄後、約 10 日間放置し、この間の真空度は同様に 6×10^{-9}Pa であった。図から明らかなように吸着物脱離のピークは、清浄表面ではほとんど観測されず、NEA 活性化を行った場合のみ観測さる。これにより残留ガスは直接 Ga や As に吸着するのではなく、活性化に用いた Cs/O に吸着することで量子効率を低下させていることが解った。

300 度以上で電流値が上昇しているのは、試料からの脱離ではなく、真空槽やその他の部分が若干加熱されるために脱離してくる成分である。明確な脱離のピークが観測されるのは質量電荷比 2、12、28、44 であり、それ以外の脱離はほとんどない。

51 − 100 の脱離がないことと、m/z=44 近傍のシグナルが小さいことから m/z=44 は CO_2 であることが容易に決定できる。m/z=28 は CO の他に N_2 である可能性を持つが N_2 のフラグメントである m/z=14 にピークが見られなかったことから CO であると考えられる。また CO と CO_2 からの m/z=12 へのフラグメントを計算すると、これは測定された m/z=12 と一致した。結果、劣化した NEA 表面に吸着している物質は H_2、CO、CO_2 が主であると推測される。

以上のように、TPD 測定による解析から、NEA 表面の劣化時には特有の結合状態が生じていることがわかる。今後、寿命測定の解析とあわせて、劣化メカニズムの理解と長寿命化に向けて開発を進める。

開発スタッフ

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

参考文献（2011 年度中の発表および掲載論文）

［1］ 栗木雅夫、加速器の低エミッタンス電子銃開発の動向、J. Vac. Soc. Jpn. Vol. 55(2), pp 29-36, 2012

［2］ 栗木雅夫、飯島北斗、増元勇騎、細田誠一、浦川順治、早野仁司、渡邊謙、杉山陽栄、倉本綾佳、高橋義知、磯山悟朗、加藤龍好、柏木茂、坂上和之、KEK-STF における L-band Rf 電子銃によるマルチバンチ生成、日本物理学会年会、27aGB-1、関西学院大学、3/24-27/20012

［3］ 飯島北斗、増元勇騎、郭磊、栗木雅夫、NEA GaAs フォトカソードの量子効率スペクトル測定による表面ポテンシャルの評価、日本物理学会年会、27aGB-5、関西学院大学、3/24-27/20012

［4］ 川瀬啓悟、加藤龍好、入澤明典、沈傑、平田祥、藤本将輝、上司文善、大角寛樹、磯山悟朗、杉山陽栄、渡邊謙、早野仁司、浦川順治、高富俊和、栗木雅夫、柏木茂、L バンドフォトカソード RF 電子銃の開発（V）、日本物理学会年会、27aGB-8、関西学院大学、3/24-27/20012

［5］ 細田誠一、栗木雅夫、飯島北斗、久保大輔、増元勇騎、郭磊、極高真空のための高感度ガス放出係数測定、日本物理学会年会、25aGB-10、関西学院大学、3/24-27/20012

[6] 西森信行、永井良治、羽島良一、山本将博、本田洋介、宮島司、栗木雅夫、飯島北斗、桑原真人、奥見正治、中西彊、次世代 ERL 光源のための 500kV 光陰極電子銃開発 , 日本物理学会年会、25pGE-2、関西学院大学、3/24-27/20012

[7] N. Nishimori, R. Nagai, R. Hajima, M. Yamamoto, T. Miyajima, Y. Honda, H. Iijima, M. Kuriki, M. Kuwahara, S. Okumi, T. Nakanishi, Status of development of a 500kV photocathode electron gun for ERL light sources, China-Korea-Japan Joint Workshop on electron/photon sources and applications

[8] N. Nishimori, R. Nagai, H. Iijima, R. Hajima, Y. Honda, T. Muto, M. Kuriki, M. Yamamoto, S. Okumi, T. Nakanishi, Status of 500kV DC Gun at JAEA, Proc. of ERL2011, 10/16-21, KEK (2011)

[9] Analysis of Quantum Efficiency Spectrum of NEA-GaAs Photo-cathode, Y. Masumoto, H. Iijima, M. Kuriki, Proc. Of IPAC2011,THPC117, San Sebastian, Spain, 9/4-9 (2011)

[10] H. Iiijima, M. Kuruki, Y. Masumoto, Surface analysis of a Degraded NEA-GaAs Photo-cathode by Temperature Programmed Desorption Technique, Proc. Of IPAC2011,THPC116, San Sebastian, Spain, 9/4-9 (2011)

[11] M. Kuriki, H. Iijima, Y. Masumoto, H. Hayano, H. Sugiyama, J. Urakawa, G. Isoyama, R. Kato, S. Kashiwagi, Y. Takahashi, RF Processing of L-band RF Gun for KEK-STF, Proc. Of IPAC2011,MOPC014, San Sebastian, Spain, 9/4-9 (2011)

[12] M.Kuriki, H. Iijima, Y. Masumoto,G. Isoyama, R. Kato, H. Hayano, J. Urakawa, H. Sugiyama, K. Watanabe, Y. Takahashi, S. Kashiwagi, High Power RF Test of L-band RF Gun at KEK-STF, 日本加速器学会年会報告集、TUPS09 7 、つくば、8/1-3 (2011)

[13] 磯山悟朗、加藤龍好、川瀬啓悟、杉本尚哉、沈傑、平田祥、藤本蒋輝、上司文善、大角寛樹、杉山陽栄、早野仁、浦川順治、高富俊和、栗木雅夫、柏木茂、L バンドフォトカソード RF 電子銃の開発（IV), 日本加速器学会年会報告集、TUPS100, つくば、8/1-3 (2011)

[14] NEA-GaAs 光陰極のビーム寿命の研究、郭磊、栗木雅夫、飯島北斗、日本加速器学会年会、TUPS116、つくば、8/1-3(2011)

[15] 細田誠一、栗木雅夫、飯島北斗、増元勇騎、郭磊、極高真空のための高感度ガス放出係数測定、日本加速器学会年会、TUPS063, つくば、8/1-3 (2011)

[16] 飯島北斗、栗木雅夫、昇温脱離法による NEA-GaAs フォトカソード表面吸着物の分析、日本加速器学会年会、TUPS074、つくば、8/1-3 (2011)

[17] 飯島北斗、栗木雅夫、久保大輔、広島大学新光陰極試験装置での NEA-GaAs フォトカソード寿命測定 , 日本加速器学会年会、TUPS075、つくば、8/1-3 (2011)

[18] 増元勇騎、栗木雅夫、飯島北斗、NEA-GaAs フォトカソードにおける量子効率スペクトラムの時間変化の解析、日本加速器学会年会、TUPS105、つくば、8/1-3 (2011)

[19] 西森信行、永井良治、羽島良一、山本将博、本田洋介、宮島司、栗木雅夫、飯島北斗、桑原真人、奥見正治、中西彊、500kV 光陰極 DC 電子銃の開発、日本加速器学会年会、MOPL05、つくば、8/1-3 (2011)

[20] 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、近匠、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、三好修平、吉玉仁、鷲尾方一、ILC 偏極陽電子源のための 3 次元 4 枚鏡共振器を用いたガンマ線生成実験、日本加速器学会年会、MOPS119、つくば (2011)

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。日立ハイテクノロジーズのグループは、500kV DC 電子銃の高電圧導入部を小型化・高信頼化するために必要な絶縁碍子と高電圧ケーブルの特性評価を目的に、高電圧試験装置を開発済みである。22 年度実施した低抵抗試験碍子の耐電圧特性評価結果に基づき、本年度は単段碍子の 500kV 高電圧導入機構を設計・製作した。

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のグループは、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）の開発を行っている。われわれは、DC 電子銃の小型化・高信頼化に取り組んでいる。小型化・高信頼化のポイントは以下の 2 点である。

(1) 導電性を制御した高耐電圧セラミックス管を採用し、電子付着起因の電位分布変動による絶縁破壊を回避する。

(2) 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、装置配置の自由度を確保する。

日本原子力研究開発機構のグループが開発中の 500kV DC 電子銃は、ガードリングを採用しセラミックス管表面への電子付着を防止することで、従来の 250kV から 500kV へと耐電圧を大幅に向上した。ただし、ガードリングは組み込みの煩雑性と表面積増大に伴う真空排気性能の低下が懸念されている。近年開発が進んでいる導電性を制御した高耐電圧セラミックスは、セラミックス表面の体積抵抗率を $10^{7\sim12}$ Ω・cm に制御することで、電子付着による帯電の防止と 4.5kV/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耐電圧の安定化が期待でき寸法を最小化できる。

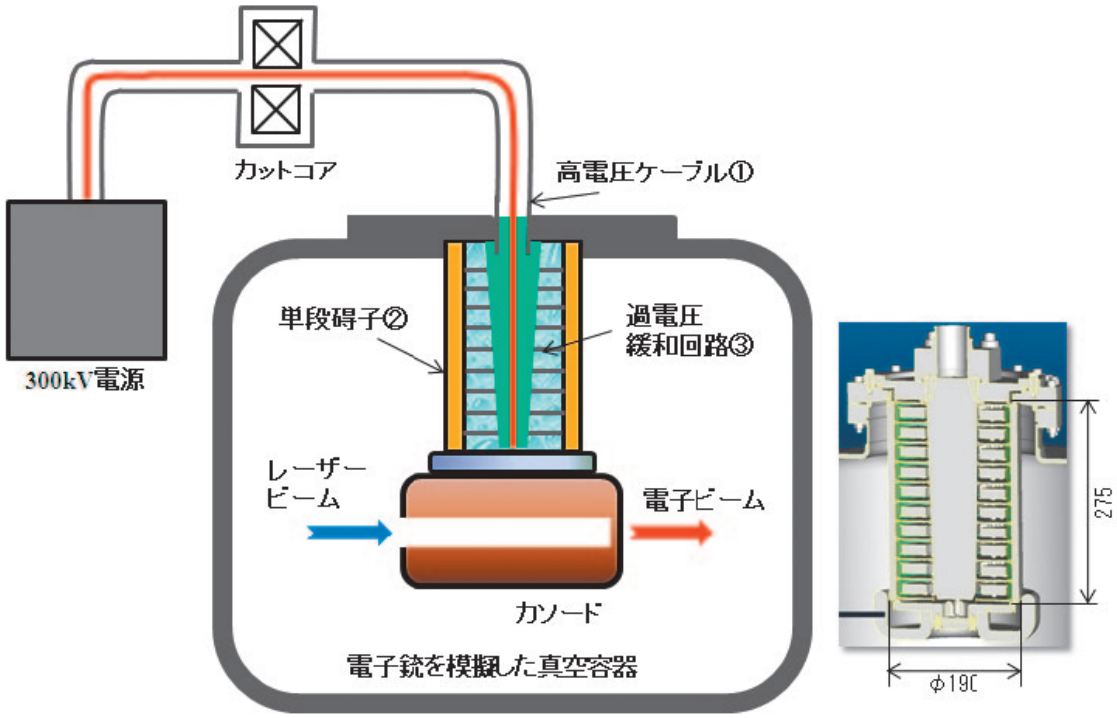
これまでの DC 電子銃と Cockcroft-Walton 型の高電圧源はセラミックス管を介して直付けした一体型構造が一般的であった。電子顕微鏡でも加速電圧 400kV 以上では一体型構造が一般的であった。しかし、近年の 1MV 超高圧電子顕微鏡では顕微鏡本体と高電圧源を高耐電圧ケーブルで接続する方式が実現できているが、地絡放電時に発生する倍電圧の減衰振動に耐える高コスト設計となっている。

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。最先端のセラミックス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、高耐電圧セラミックス管への組立てには、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、実体系の高耐電圧セラミックス管にて耐電圧評価する必要がある。

今年度は、昨年度報告の 500kV 絶縁碍子の構想設計に基き、新規に単段碍子の 500kV 高電圧導入機構を詳細設計・製作した。これらの成果を以下に述べる。

2. 高電圧導入機構の構成

高電圧導入機構を図１に示す。電子銃と高圧電源を高耐電圧ケーブルで接続する。接続部である高電圧導入機構の主な構成要素は、高電圧ケーブル①の端末と単段碍子②、過電圧緩和回路③である。碍子②の先端には、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。



(a) 高電圧試験装置　　(b) 高電圧導入機構

図１　単段碍子の 500kV 高電圧導入機構の模式図

3. 高耐電圧ケーブル端末の試作

試作した高耐電圧ケーブル端末の写真を図２に示す。

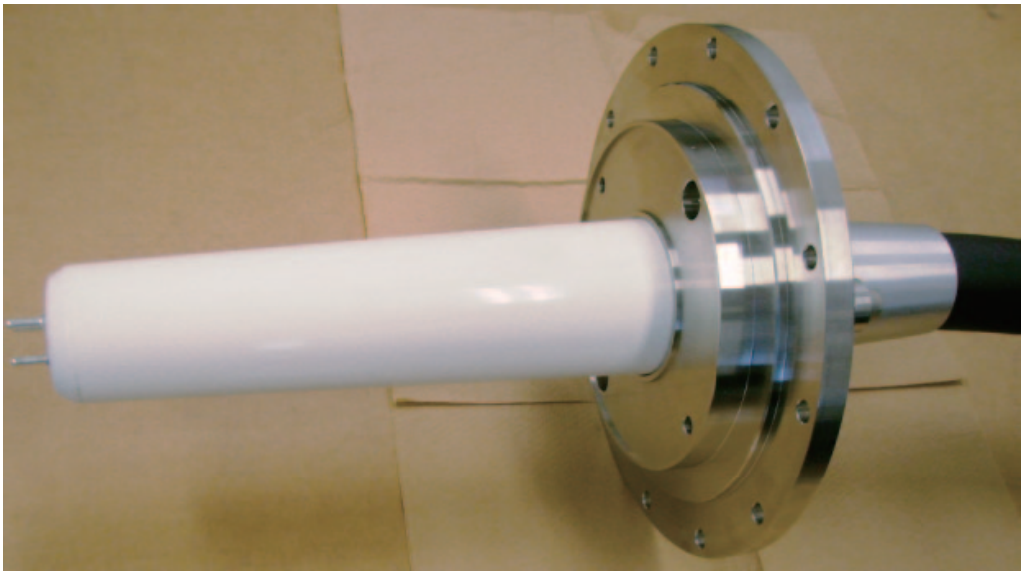


図２　試作した高耐電圧ケーブル端末

市販（Claymount 社製）の 300kV 高電圧ケーブル絶縁層は EPR 材 15mm であり 600kV 以上の耐電圧性能を持つ。従って、課題は端末の沿層方向電界強度を緩和する電界緩和電極（ストレスリリーフコーン）の形状である。図 3 がストレスリリーフコーンの計算モデルである。

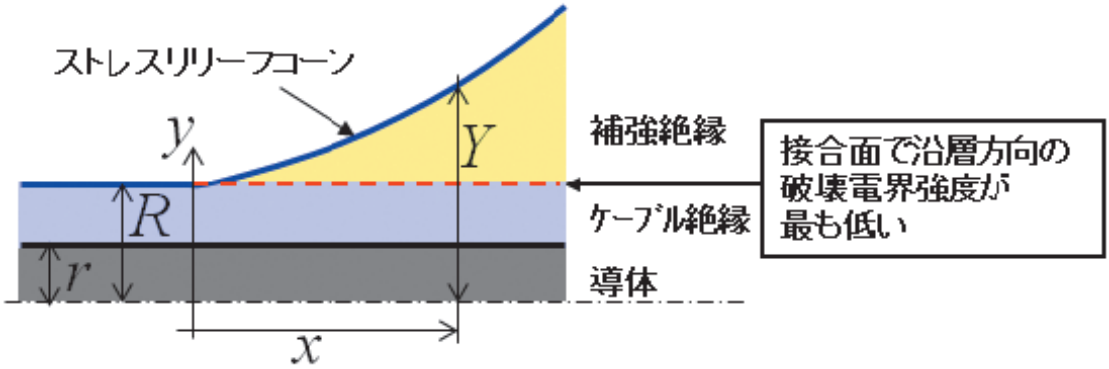


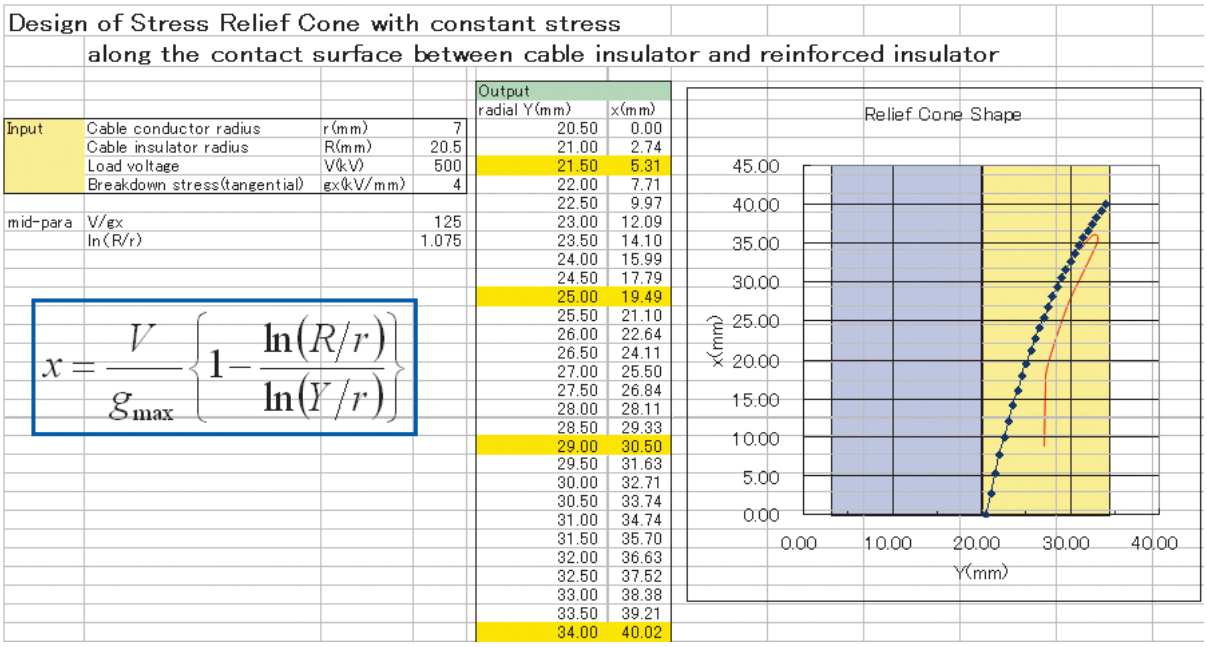
図３　ストレスリリーフコーンの計算モデル

リーフコーン内の電位分布を式 1 で近似すると、沿層 (x) 方向の電界強度 g_x は式 2 となる。y=R における電界強度が一定値 g_{max} として式 2 を書き換えると x と Y の関係式 3 を得る。具体的な計算結果を図 4 に示す。標準品では g_{max}= 8kV/mm で設計していたが、今回 4kV/mm に半減したことで、600kV 以上の耐電圧性能が期待できる。

$$v = V\ln(y/Y)/\ln(r/Y) \qquad \cdots\cdots\cdots \text{（式 1）}$$

$$g_x = \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{V}{Y}\frac{\ln(r/y)}{\{\ln(r/Y)\}^2}\frac{\partial Y}{\partial x} \qquad \cdots\cdots\cdots \text{（式 2）}$$

$$x = \frac{V}{g_{max}}\left\{1 - \frac{\ln(R/r)}{\ln(Y/r)}\right\} \qquad \cdots\cdots\cdots \text{（式 3）}$$



Design of Stress Relief Cone with constant stress along the contact surface between cable insulator and reinforced insulator

Input	Cable conductor radius	r(mm)	7
	Cable insulator radius	R(mm)	20.5
	Load voltage	V(kV)	500
	Breakdown stress(tangential)	gx(kV/mm)	4
mid-para	V/gx		125
	ln(R/r)		1.075

$$x = \frac{V}{g_{max}}\left\{1 - \frac{\ln(R/r)}{\ln(Y/r)}\right\}$$

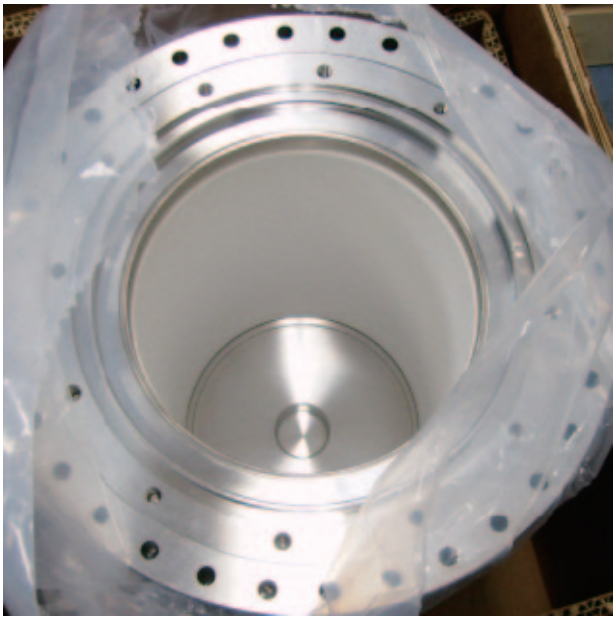
Output radial Y(mm)	x(mm)
20.50	0.00
21.00	2.74
21.50	5.31
22.00	7.71
22.50	9.97
23.00	12.09
23.50	14.10
24.00	15.99
24.50	17.79
25.00	19.49
25.50	21.10
26.00	22.64
26.50	24.11
27.00	25.50
27.50	26.84
28.00	28.11
28.50	29.33
29.00	30.50
29.50	31.63
30.00	32.71
30.50	33.74
31.00	34.74
31.50	35.70
32.00	36.63
32.50	37.52
33.00	38.38
33.50	39.21
34.00	40.02

図４　ストレスリリーフコーンの計算結果

4. 500kV 単段碍子の試作

図 5(a) に今回試作した 500kV 単段碍子と (b) に前回試作した 300kV 多段碍子の外観写真を示す。従来の 500kV 多段碍子サイズが約 800mm であるのに対し、今回 300mm の単段碍子を設計試作した。22 年度のサンプル試験で真空リークが問題となったことから、メーカーと共同で熱応力を従来から半減したロウ付け構造を開発した。碍子素材は低抵抗アルミナ TA010 と高抵抗アルミナ A479 を用いて 2 式試作し、真空リークが無いことを確認した。

電子源から出射した電子の一部は、接地電位の絞りや真空容器で弾性散乱を起こし、カソードや碍子に跳ね返ってくる。しかし負電界により、再び、接地電位に向かって加速され衝突し、同様のジャンピング動作を繰り返し、次第にそのエネルギーを失って、接地に近い碍子の表面に衝突する。その際、この衝突する電子以上の二次電子が発生し、通常の高抵抗碍子 A479 の場合、次第に碍子表面の電位分布が偏歪し、あたかも、接地電位がカソード側に移動したような電位分布となる。結果として、碍子につながるカソード表面の電界強度が増加し、冷陰極電界放出が放出されて、最終的に碍子表面の沿面放電を引き起こす。一方、低抵抗碍子 TA010 を使用すると、碍子に流入する弾性散乱電子よりも大きな電流が導電性碍子表面を流れ、碍子の長手方向の電位が変動しない。



(a) 今回試作した 500kV 単段碍子

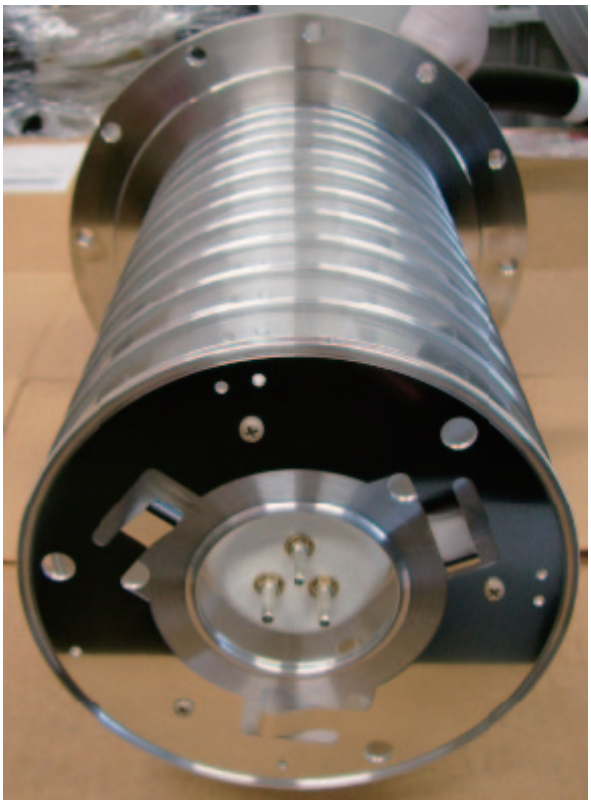
(b) 前回試作した 300kV 多段碍子

図５　試作した碍子外観

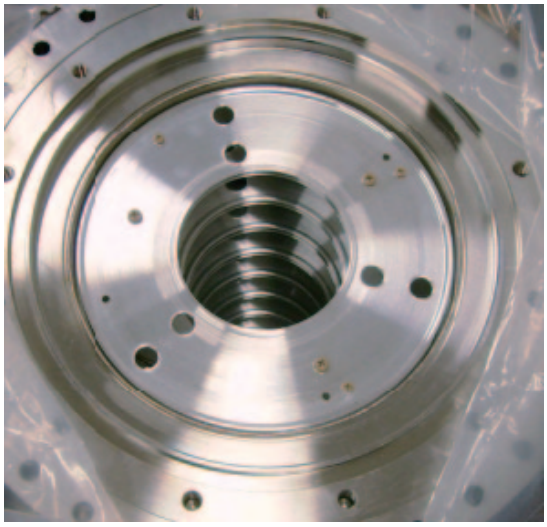
5. 過電圧緩和回路の試作

高電圧ケーブル端末と 500kV 単段碍子の隙間を埋める 10 段構造の過電圧緩和回路を新規設計した。今年度は分圧器としてのみ機能するプレートと分圧抵抗器までを試作し、500kV 単段碍子に実装できることを確認した。図 6 に分圧器の外観を示す。(a) は分圧器単体、(b) はケーブル端末挿入時、(c) は単段碍子への実装時である。プレート内周とケーブル端末、およびプレート外周と碍子はコイルバネの弾性を利用して密着している。

(a) 分圧器単体構成



(b) ケーブル端末挿入時



(c) 単段碍子への実装時

図６　分圧器の外観

プレート間の隙間には 3M 社製フロリナートを真空排気・充填する。フロリナートは AC 商用周波数実行値の破壊電界強度が 13.77kV/mm である。直流電圧での沿面破壊電界強度は不明であるが、絶縁油の値から推測すると 3.51kV/mm が期待できる。碍子長は 300mm であるから約 1000kV の耐電圧となる。

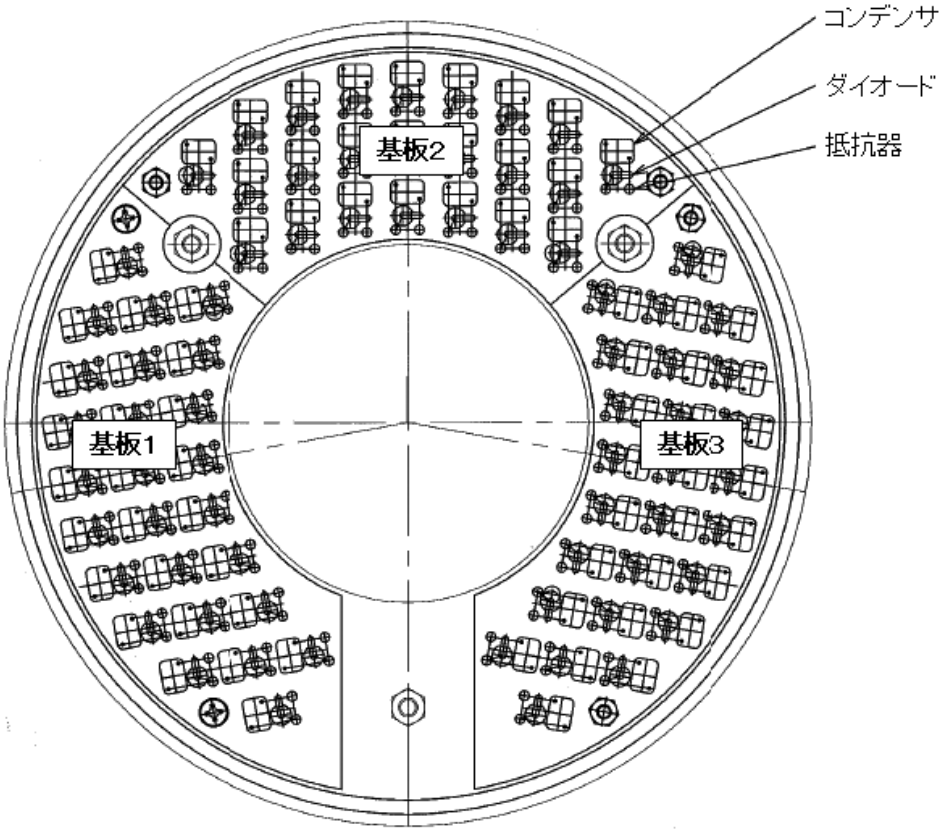


図７　過電圧緩和回路の基板設計

図 7 に示すように、抵抗とコンデンサー、ダイオードの並列回路単位（耐電圧 1kV）を 75 組直列配置した 1 段 50kV 分の基板設計を完了した。各回路単位は電位が 1kV づつ異なるため、基板を周方向に三分割し、高さを変えてプレート間に実装する。

6. カットコアの設計

電子銃内部で真空絶縁破壊（地絡）が発生すると、高電圧ケーブルの静電容量が電子銃構造物の有する放電経路の残留インダクタンスと共振し､減衰振動を起こす｡最大電圧は倍電圧となる恐れがある｡電子銃と並列に高速ダイオードを接続することにより､理論的には正極性の電圧を整流できる｡しかし､高電圧ケーブルの電容量 300pF とインダクタンス 1μH から振動周波数は約 10MHz、ピーク電流 10^4A となるため使えるダイオードが限定される。ファインメットカットコアを追加することでインダクタンスを調整し、電圧振動周波数を 2MHz 以下に抑えられ、実用的設計が可能となる。

7. まとめ、次年度の予定

500 kV DC 電子銃の高電圧導入部を小型化・高信頼化する高電圧導入機構を詳細設計し、試作した。すなわち、(1) ストレスリリーフコーンの形状改良によるケーブル端末の高耐圧化、(2) 低抵抗セラミックスを用いた碍子の小型単段化、(3) 抵抗とコンデンサー、ダイオードの並列回路による過電圧緩和回路設計である。次年度は、過電圧緩和回路基板とカットコアを製作実装し、500kV 高電圧導入機構の開発を完了する予定である。

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：渡辺　俊一、村越　久弥、金田　実（日立ハイテクノロジーズ）

参考文献

（2011 年度中の発表および掲載論文）なし

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進めている。前年度までの業務で製作した装置をビーム引き出しが可能な状態に設定し、高電圧印加試験を行った。526kV までの電圧印加と 440kV での 8 時間連続無放電試験に成功し、実用化試験の第一段階を終えた。運転中に発生した暗電流は真空容器中の微細な塵の電極への付着が原因であることがわかり、ガスコンディショニングによる暗電流の低減を試みたところ一定の改善を確認した。

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) 光陰極はレーザー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 に開発中の光陰極 DC 電子銃の構成を示す。光陰極はカソード電極先端にインストールされており、カソード・アノード間に 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。電子ビームの空間電荷効果を抑制し、低エミッタンスビームを生成するには、電子銃で高エネルギー加速する必要がある。そこで、われわれは米国ジェファーソン研の運転実績 350kV を大きく上回る 500kV 電子銃の開発を進めている。欧米でも同タイプの光陰極 DC 電子銃が開発されているが、500kV 電子銃開発には成功していない。セラミック管とカソード電極をつなぐサポートロッドから電界放出電子が発生し、セラミック管を破損してしまう問題を解決できなかったためである。われわれは、分割型セラミック管とガードリングを用いて、電界放出電子がセラミック管を直接叩かない構造を採用した。これによりセラミック管破損問題を解決し、2009 年度に世界で初めて 550kV の高電圧印加に成功し、セラミック管に 500kV 印加した状態で 8 時間の連続無放電試験にも成功した。ただし、この試験時には、サポートロッドからの電界放出電子の効果を調べるため、電極、真空ポンプはインストールされてなかった。2010 年度には、カソード･アノード電極、及び非蒸発型ゲッターポンプを電子銃高電圧容器にインストールし、380kV までの高電圧印加を達成し、300kV でのビーム生成を行った。

今年度は、引き続きビーム引き出しが可能な状態に装置を設定し、定格電圧運転を目指した高電圧印加試験を実施した。これまでに、1）526kV までの高電圧印加、2）440kV での 8 時間連続無放電に成功し、実用化試験の第一段階を終えた。印加できる電圧が 550kV に到達できない原因が、高電圧印加試験中にカソード電極から発生する暗電流であることを突き止め、3）その源が電子銃容器内の微細粉塵によるものであることを拭き取り試験により確認した。この暗電流を低減するため、4）ガスコンディショニングを試みて一定の改善を確認した。これらの成果を以下に述べる。

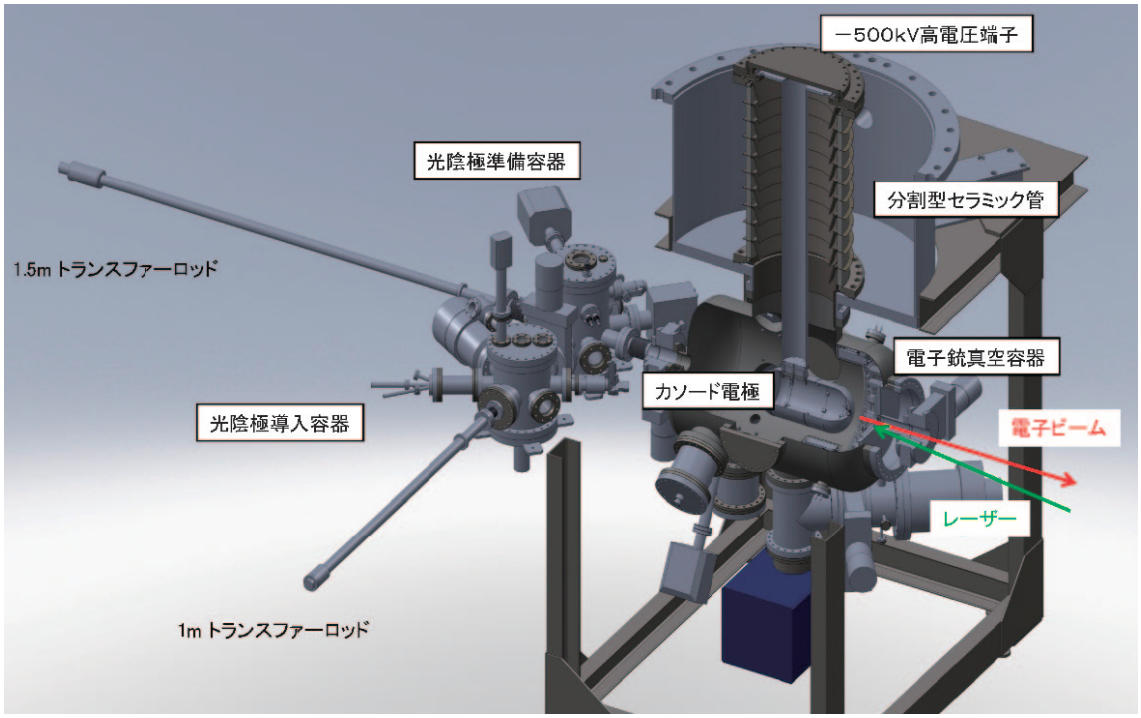


図 1　500kV 光陰極 DC 電子銃の構成。絶縁用のセラミック管の上端に負電位（−500kV）を印加する。カソード電極の先端中央に光陰極が装着され、正面から照射されるレーザーによって光電子を発生し、電子ビームとして引き出される。

2. 高電圧印加試験

光陰極 DC 電子銃の最大の技術的チャレンジの一つが、安定な高電圧印加である。われわれは、多段分割型セラミック管を用いることで、放電によるセラミック管の破損問題の解決をみたが、カソード電極をつけた状態で新たな問題が生じた。それは、高電圧印加試験の際に、ある電圧で突然暗電流が発生し始めることである。図 2（上）に高電圧コンディショニングの様子を時間の関数でプロットしている。100 時間以上かけて 250kV から 510kV まで電圧を上げることに成功したが、図 2（左下）に示す位置に局所放射線が突然発生した。その後、それまで観測されてなかった放射線が図 2（右下）に示すように 350kV から発生するようになった。われわれは、局所放射線発生の原因を、電子銃真空容器内の微細粉塵にあると考えた。高電圧コンディショニング中の放電により、電子銃容器内の微細粉塵がプラスに帯電し、ある電圧以上でカソード電極に付着し、放射線を発生するというシナリオである。

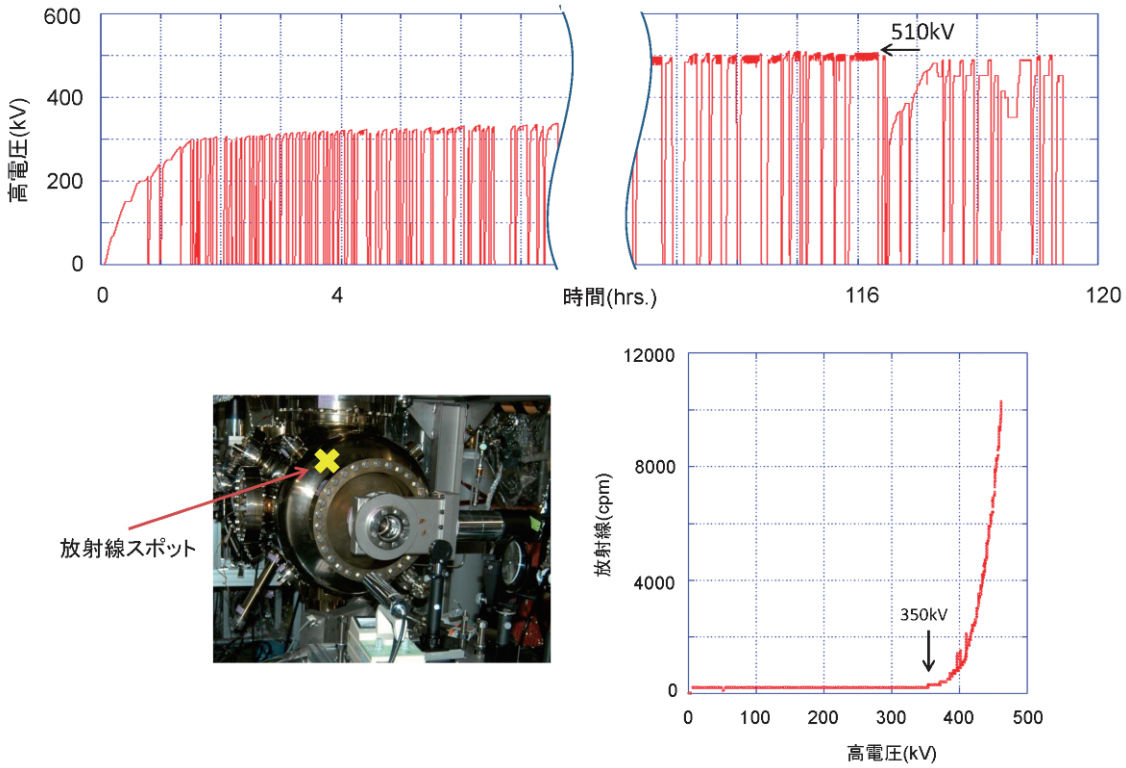


図２　高電圧印加試験の電圧を時間の関数でプロット（上）。100 時間以上かけて 510kV まで印加することに成功したが、局所放射線が突然発生した。左下は放射線スポットの位置を示す。右下は放射線モニターで計測した印加電圧を関数とした放射線を示す。510kV で急に放射線が発生するようになった後、右下に示すようにそれまで観測されてなかった放射線が 350kV から出現するようになった。

そこで、電子銃真空容器を窒素パージし、大気の混入を抑制しながら放射線発生個所と思われるカソード電極部の拭き取り（不織布による）を実施した。ベーキングをせずに NEG ポンプの再活性化を行い、真空が 1×10^{-8}Pa に回復した後（図 3（下）参照）、高電圧コンディショニングを再開した。図 3（上）に示すように、450kV 程度までの印加に 1 時間程度で成功した。既にシステムがコンディショニングされていたためと考えられる。その後、100 時間以上の高電圧印加試験の結果、526 kV に到達し真空度も 3×10^{-9}Pa まで回復した。しかしながら、また別の場所で局所放射線が発生したため電圧印加試験を中断した。本試験の結果とその後の同様の試験から、拭き取りにより微細粉塵が 100％除去できることを確認し、放射線の発生が微細粉塵に由来することを確認した。この拭き取りを繰り返すことで目標電圧に到達できる可能性はあるが、システムをパージする必要があること、時間も要することから、微細粉塵除去のための他の可能性を探っている。

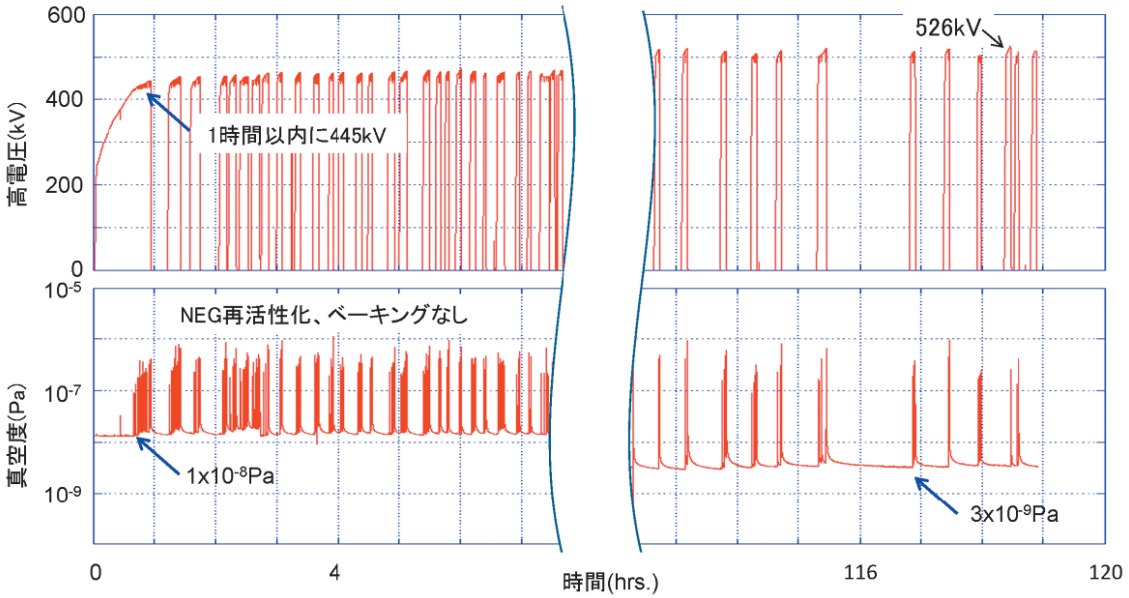


図３　高電圧印加試験の電圧（上）と真空度（下）を時間の関数で示す。電子銃真空容器を窒素パージし、大気の混入を抑制しながら放射線発生個所と思われるカソード電極部を拭き取った後に実施した。ベーキングをせずに NEG ポンプの再活性化を行い、1 × 10^{-8} Pa に到達した。100 時間以上の高電圧印加試験の後、526kV に到達し真空度も 3 × 10^{-9} Pa に回復した。

図 4（左）に連続無放電試験の結果を示す。この試験前に、440kV 付近から放射線が発生し始めたが（図 4（右下）参照）、そのまま 500kV までコンディショニングを行った。その後、440、460、480kV で連続無放電試験を実施した。440kV では 8 時間の連続無放電を達成し、真空度は 8 × 10^{-10} Pa で一定、放射線レベルもバックグランドレベルで変化のないことを確認した。この電圧でのビーム引き出しの目途をたて、実用化試験の第一段階を終えた。ところが、放射線の発生量と共に無放電時間は短くなり、460kV では 2 時間、480kV では 0.5 時間であった。500kV での 8 時間連続無放電を達成するには、500 kV で放射線が発生しないこと、500kV より充分高い電圧までコンディショニングする必要があることがわかった。

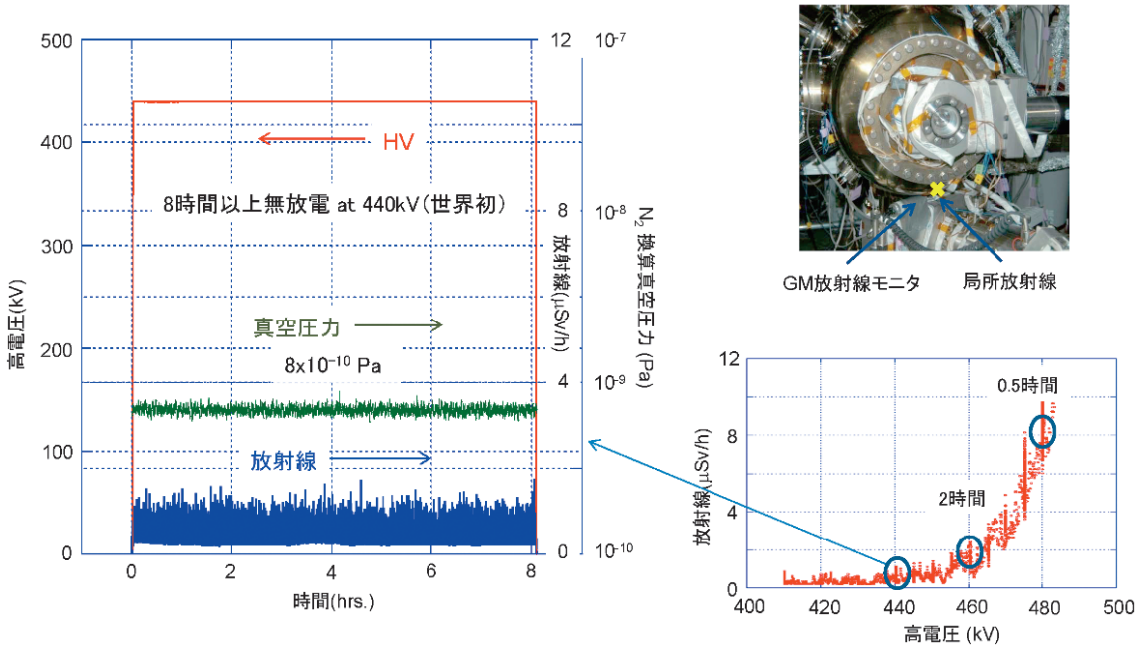


図４　440kV での高電圧８時間無放電試験の結果（左）。試験の間、真空度は 8×10^{-10} Pa で一定、放射線レベルも変化はなく、無放電であった。この試験は局所放射線が観測された状態で実施した。右上に局所放射線の位置と GM 検出器を設置した場所を示す。右下は高電圧の関数として測定した放射線を示す。440kV では、放射線はほぼバックグランドレベルであり、放射線の発生している 460kV では無放電時間は２時間、480kV では 0.5 時間であった。

３．ヘリウムガスコンディショニング

カソード電極に付着した微細粉塵による暗電流を低減する方法として、ガスコンディショニングがある。真空容器内に不活性ガスを 10^{-3} Pa から 10^{-2} Pa 程度入れた状態で高電圧を印加すると、暗電流によりイオン化されたガスが、暗電流の源である微細粉塵に向けて加速される。微細粉塵を削り、表面を改質して暗電流を低減する効果がある。この手法は、米国ジェファーソン研やコーネル大で有効性が確認されており、われわれもヘリウムガスを用いてガスコンディショニングを試みた。図５（左）はコンディショニング中の高電圧（赤）、真空度（緑）、放射線（青）を時間の関数としてプロットしたものである。ヘリウムのガス圧を 5×10^{-3} Pa にセットし、１時間程度コンディショニングを行った。高電圧電源の電流値を 0.1μA の精度で測定できるため、精度良く暗電流を測定できる。充分なイオンが生成されてコンディショニングの効果が上がるように、0.3μA 以上の暗電流が流れるように電圧を設定した。コンディショニング中には判然としなかったが、その効果を確認することができた。図５（右）にコンディショニング前（赤）、後（青）での放射線量を電圧の関数として表す。同じ電圧で放射線量が 1/10 程度に減少し、一定の効果があることがわかった。

ただし、暗電流に起因する放射線が真空容器近傍で 1μSv/h 程度以上の値を示している状態では、8 時間以上の高電圧保持が困難という結果が得られている（図４参照）。コンディショニング後に 200kV で 45μSv/h の放射線が出ている状態を、500kV で 1μSv/h 以下にまで低減するのは、かなりの困難が予想される。ジェファーソン研究所で実績のあるクリプトンガスを用いることで、微細粉塵に衝突する際の衝撃をヘリウムより大きくして、コンディショニングの効果を上げる等、より効率的な方法を試す予定である。

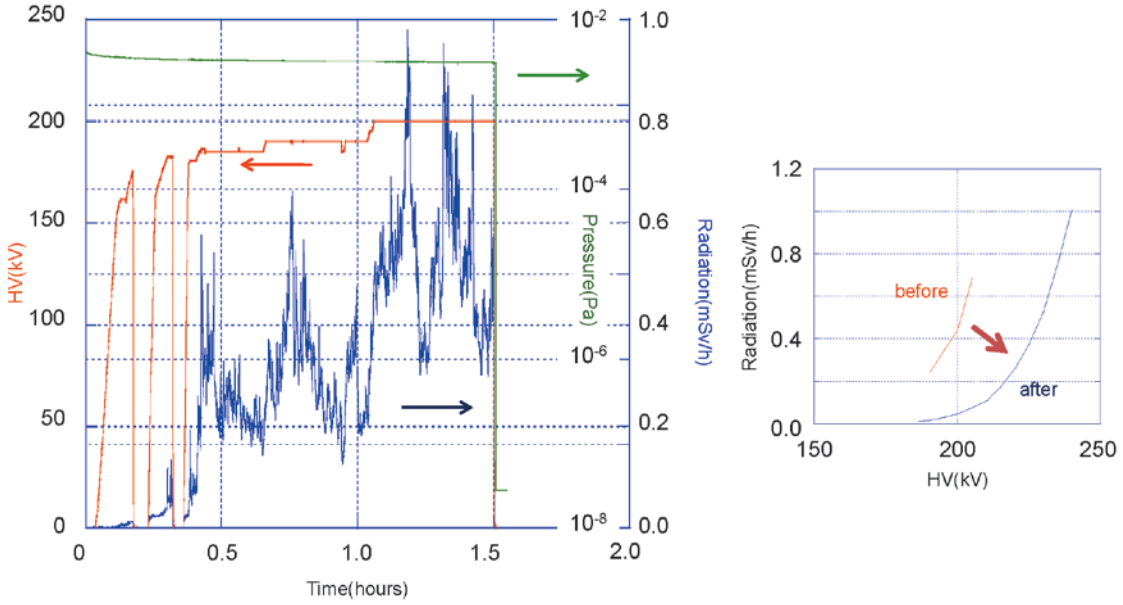


図５　ヘリウムガスコンディショニング。左図は高電圧（赤：単位 kV）、真空度（緑：単位 Pa）、放射線（青：単位 mSv/h）を時間の関数としてプロット。ヘリウムのガス圧を５×10^{-3} Pa にセットし、１時間程度コンディショニングを行った。右図はコンディショニング前（赤）後（青）での放射線を高電圧の関数として示す。

４．次年度の予定

高電圧印加の障害となっている電極表面の粉塵対策として、クリプトンガスによるガスコンディショニングと電極形状の変更による表面電界低減を実施し、問題の解決を図る。これらの改良を施した後に 500kV 電圧でのビーム引き出し試験を行う予定である。また、KEK にて超伝導加速器と組み合わせた総合試験（ビーム引き出し試験）を行うため、平成 24 年 10 月には装置の移設作業に着手し、平成 25 年 3 月までにビーム生成試験を行う予定である。

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）

参考文献（2011 年度中の発表および掲載論文）

[1]　“Development of a 500-kV dc gun”（口頭）, N. Nishimori, R. Nagai, R. Hajima, The 12th Symposium on Advanced Photon Research, Kizugawa, Japan, 2011 年 5 月 .

[2]　“Ultimate performance of modern electron sources”（口頭、招待講演）, N. Nishimori, Ultra Bright Electron Sources Workshop, Cockcroft Institute, Daresbury, UK, 2011 年 6 月 .

[3]　“Cooling Properties of HOM absorber model for cERL in Japan“（ポスター）, M. Sawamura, T. Furuya, H. Sakai, K. Umemori, K. Shinoe, C. Enrico, 15th International Conference on RF Superconductivity (SRF 2009) Chicago, USA, 2011 年 7 月 .

[4]　“High Power Tests of KEK-ERL Input Coupler for Main Linac under Liquid Nitrogen

Condition”（ポスター）, H. Sakai, T. Furuya, K. Umemori, K. Shinoe, M. Sawamura, C. Enrico 15th International Conference on RF Superconductivity (SRF 2009) Chicago, USA, 2011年7月.

[5] “VERTICAL TEST RESULTS ON KEK-ERL 9-CELL L-BAND SUPERCONDUCTING CAVITY”（ポスター）, E. Cenni, T. Furuya, H. Sakai, K. Umemori, M. Sawamura, K. Shinoe, 15th International Conference on RF Superconductivity (SRF 2009) Chicago, USA, 2011年7月.

[6] “Construction of cERL Cryomodules for Injector and Main Linac”（口頭）, K. Umemori, T. Furuya, E. Kako, S. Noguchi, H. Sakai, M. Satoh, T. Shishido, K. Watanabe, Y. Yamamoto, E. Cenni, M. Sawamura, K. Shinoe 15th International Conference on RF Superconductivity (SRF 2009) Chicago, USA, 2011 年 7 月 .

[7] “ERL 主ライナックのためのカプラー開発 ― 試作カプラー 1 号機におけるハイパワー試験 ―”（ポスター）, 篠江憲治 , 阪井寛志 , 梅森建成 , E. Cenni, 沢村勝 , 中村典雄 , 古屋貴章 , 第 8 回日本加速器学会年会 , つくば , 2011 年 8 月 .

[8] “500-kV 光陰極 DC 電子銃の開発 ”（口頭）, 西森信行 , 永井良治 , 羽島良一 , 山本将博 , 宮島司 , 本田洋介 , 飯島北斗 , 栗木雅夫 , 桑原真人 , 奥見正治 , 中西彊 , 第 8 回日本加速器学会年会 , つくば , 2011 年 8 月 .

[9] “ 次世代 ERL 光源のための 500kV 光陰極電子銃開発の現状 ”（口頭）, 西森信行 , 永井良治 , 羽島良一 , 山本将博 , 宮島司 , 本田洋介 , 飯島北斗 , 栗木雅夫 , 桑原真人 , 奥見正治 , 中西彊 , 日本原子力学会 2011 年秋の大会 , 北九州 , 2011 年 9 月 .

[10] “Status of 500-kV DC Gun at JAEA”（口頭）, N. Nishimori, R. Nagai, R. Hajima, M. Yamamoto, T. Miyajima, Y. Honda, H. Iijima, M. Kuriki, M. Kuwahara, S. Okumi, T. Nakanishi, The 50th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs (ERL2011), Tsukuba, Japan, 2011 年 10 月 .

[11] “HOM properties of main linac for cERL in Japan”（口頭）, M. Sawamura, T. Furuya, H. Sakai, K. Umemori, M. Sato, K. Shinoe, C. Enrico, 50th Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs (ERL ’11) Tsukuba, Japan, 2011 年 10 月 .

[12] “Development of main linac cavity for cERL project”（口頭）, K. Umemori, T. Furuya, H, Sakai, M. Satoh, K. Shinoe, M. Sawamura, E. Cenni, 50th Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs (ERL ’11) Tsukuba, Japan, 2011 年 10 月 .

[13] “Development of input coupler for cERL main linac”（口頭）, H. Sakai, T. Furuya, M. Sato, K. Shinoe, E. Cenni, K. Umemori, M. Sawamurav, 50th Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs (ERL ’11) Tsukuba, Japan, 2011 年 10 月 .

[14] “Performance Evaluation of KEK Tuner”（口頭）, K. Enami, T. Furuya, H. Sakai, M. Sato, K. Shinoe, K. Umemori, E. Cenni, M. Sawamura, 50th Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs (ERL ’11) Tsukuba, Japan, 2011 年 10 月 .

[15] “Vertical test diagnostics and simulation studies for 9-cell cERL cavities”（口頭）, E. Cenni, T. Furuya, H. Sakai, K. Umemori, K. Shinoe, M. Sato, M. Sawamura, 50th Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs (ERL ’11) Tsukuba, Japan, 2011 年 10 月 .

[16] “Status of photoemission DC gun development at JAEA”（口頭）, N. Nishimori, R. Nagai, R. Hajima, M. Yamamoto, Y. Honda, T. Miyajima, H. Iijima, M. Kuriki, M. Kuwahara, S. Okumi, T.

Nakanishi, ICFA Workshop on Future Light Sources (FLS2012), Newport News, VA, USA, 2012 年 3 月 .

[17] “ 高輝度電子銃開発状況 ”（口頭）, 西森信行 , 永井良治 , 羽島良一 , 山本将博 , 本田洋介 , 宮島司 , 飯島北斗 , 栗木雅夫 , 桑原真人 , 奥見正治 , 中西彊 , 第 29 回 PF シンポジウム , つくば , 2012 年 3 月 .

[18] “ 次世代 ERL 光源のための 500kV 光陰極電子銃開発 ”（口頭、シンポジウム「次世代放射光源への期待」), 西森信行 , 永井良治 , 羽島良一 , 山本将博 , 本田洋介 , 宮島司 , 飯島北斗 , 栗木雅夫 , 桑原真人 , 奥見正治 , 中西彊 , 日本物理学会第 67 回年次大会 , 関西学院大 , 2012 年 3 月 .

[19] “Development of main linac module for Compact ERL project（ポスター）, K. Umemori, T. Furuya, H. Sakai, T. Takahashi, K. Shinoe, M. Sawamura, Proc. of XXV Linear Accelerator Conference (LINAC10), 2010 年 9 月 .

[20] “Development of a 500-kV Photo-Cathode DC Gun for ERL Light Sources, N. Nishimori, R. Nagai, R. Hajima, M. Yamamoto, T. Miyajima, Y. Honda, T. Muto, H. Iijima, M. Kuriki, M. Kuwahara, S. Okumi, T. Nakanishi, Proc. of XXV Linear Accelerator Conference (LINAC10), 2010 年 9 月 .

[21] “Development of a 500-kV photocathode DC gun for ERLs, N. Nishimori, R. Nagai, H. Iijima, R. Hajima, M. Yamamoto, T. Miyajima, T. Muto, Y. Honda, M. Kuriki, M. Kuwahara, S. Okumi, T. Nakanishi, J. Phys.:Conf. Ser. 298, 012005 (2011). 2010 年 10 月 .

[22] 500-kV 光陰極 DC 電子銃の開発 , 西森信行 , 永井良治 , 羽島良一 , 山本将博 , 宮島司 , 本田洋介 , 飯島北斗 , 栗木雅夫 , 桑原真人 , 奥見正治 , 中西彊 , 第 8 回日本加速器学会年会論文集 , MOPL05 (2011)2011 年 8 月 .

C-3. CW 超伝導加速空洞研究開発
R&D on CW Superconducting Cavity

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。今年度は、加速に有害な高調波（HOM）を空洞から取り出した後に吸収するための HOM ダンパーの開発として、HOM ダンパーを構成する櫛歯型 RF ブリッジの伝熱特性とフェライトの冷却サイクル耐久性能の測定を行った。

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。HOM ダンパーは 2K の低温に冷却された超伝導空洞間に配置され、クライオモジュールと呼ばれる真空断熱槽の中に設置される。HOM ダンパーは、空洞の 2K 部分への熱侵入を減らすために、HOM 吸収体の部分は液体窒素温度に、超伝導空洞の接続部分は 2K の液体ヘリウム温度に冷却されるため、冷却時に各部分の温度変化の違いにより、冷却ひずみが発生する。HOM ダンパーと超伝導加速器とのひずみは HOM ダンパーの櫛歯型 RF ブリッジおよびベローズで吸収される。そのため HOM ダンパーの櫛歯部分は予期せぬ接触を起こす可能性があり、そのような場合でも液体ヘリウムへの伝熱が少なくなる必要がある。

また HOM 吸収体は HIP（Hot Isostatic Pressing：熱間等方圧）処理によって土台となる銅円筒に焼結されるが、フェライトと銅では熱膨張係数が異なるため、室温から液体窒素温度に冷却する際に熱収縮ひずみが発生する。冷却サイクルに対してフェライトの耐久性を確認する必要がある。

そのため昨年度は HOM ダンパー実機を製作する際に重要な温度特性を調べるため、HOM ダンパー試作機を製作し、冷却試験、伝熱特性試験を行ったが、今年度は、HOM ダンパー試作機を用いてモジュールに組み込んだ際の HOM ダンパーの変形による伝熱特性の変化を調べた。また HOM 吸収体の冷却サイクルに対する耐久性を調べるため、HOM 吸収体部分のみのモデルを製作し、室温から低温への冷却サイクル試験を行った。

2. HOM ダンパー櫛歯型 RF ブリッジの伝熱特性の測定

HOM ダンパーのフランジ部分には、接続の自由度や熱収縮の余裕を持たせるためにベローズを用いるが、ベローズ前後のビームパイプの接続には RF ブリッジが用いられる。RF ブリッジは、機器内部の隙間や空洞を埋めてバンチに伴う壁電流を滑らかに流すことで、HOM の発生を防ぎ、またビームインピーダンスを下げる役割を持っている。従来、RF ブリッジには薄い金属製のフィンガー型が用いられてきたが、フィンガー型は隙間から漏れる HOM によって機器が発熱し易く、フィンガースライド部の電気的接触の保証が難しいなどの問題があった。

HOM ダンパーの RF ブリッジとして、液体ヘリウム領域への入熱を小さくするために櫛歯型 RF ブリッジを用いた。櫛歯型 RF ブリッジは櫛歯が互いに噛み合うように対向した構造をしている（図 6（中））。櫛歯型はフィンガー型の高周波接続に比べてインピーダンスが小さく、熱伝導も小さいという利点がある。しかし超伝導空洞および HOM ダンパーの冷却の際には、冷却による熱収縮ひずみを櫛

歯型 RF ブリッジおよびベローズで吸収することになるため、向かい合う櫛歯同士が接触する恐れがある。そこで、①長さ方向に櫛歯が接触する場合（図６（左））、②櫛歯が傾いて接触する場合（図６（右））、の２種類の状況における伝熱特性を調べた。

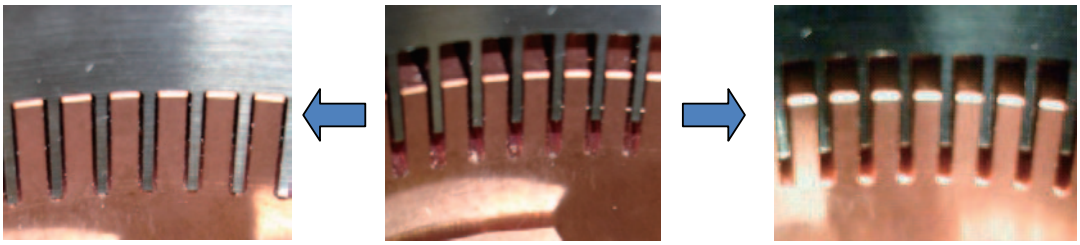


図６　櫛歯接触の様子。（左）長さ方向接触、（中）正常位置、（右）傾き接触

櫛歯を接触させた状態で図７のように断熱真空槽に設置し、液体窒素タンクからブレード線の伝熱を用いて HOM ダンパーを冷却し、HOM ダンパー中央部とフランジ部分の温度変化を測定して熱抵抗を求めた。

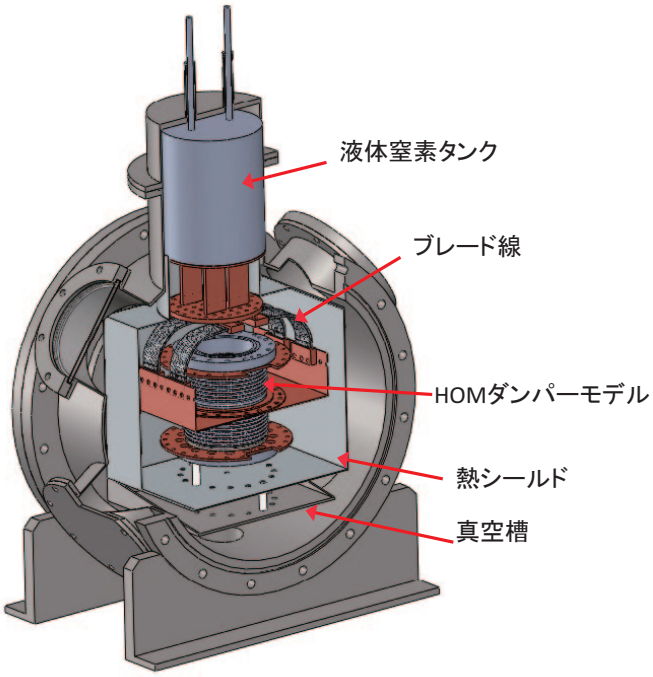


図７　櫛歯接触時の伝熱特性測定のための冷却試験セットアップ概略図

結果を図８に示す。各測定結果で右側の熱抵抗が小さくなっている部分は、対向する櫛歯間での熱輻射による冷却が起こっているため、熱抵抗が小さくなっているものと思われる。また左側の熱抵抗が大きくなっている部分は、櫛歯の両側で測定誤差による温度差があるにも関わらず温度変化がなくなっているため、熱抵抗が大きくなっているものと思われる。熱輻射や測定誤差の少ない中央部分が櫛歯接触による熱抵抗の変化を示している。熱抵抗は正常位置に比べて、傾き接触の場合は約 2/3、長さ方向接触の場合は約 1/10 に減少している。正常位置での入熱が 2W であるのに対して、長さ方向の接触の場合は 15W と液体ヘリウムへの大きな負荷となる。そこで櫛歯が接触した場合でも入熱が大きくならないように、①櫛歯の溝部分の一部を浅くする、②櫛歯の先端をナイフエッジにする、③半径方向の切込みを放射状カットと平行カットの組み合わせにする。などの櫛歯形状の改良を行い、たと

え櫛歯が接触しても点接触になるようにした。

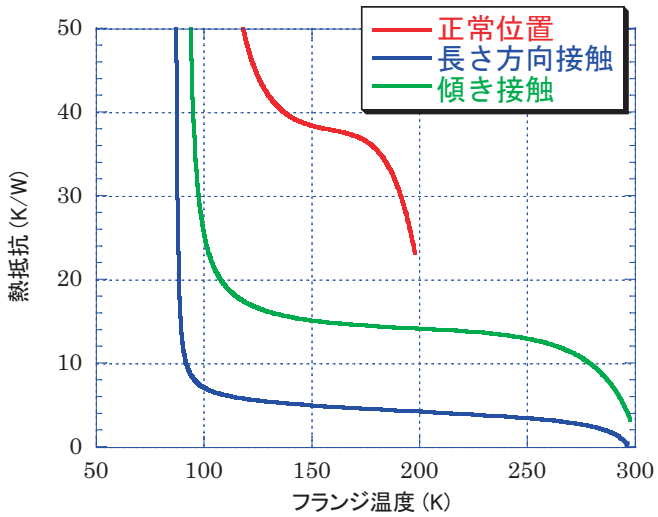


図８　櫛歯接触による熱抵抗の変化

3. HOM ダンパーフェライトの冷却サイクル耐久試験

HOM ダンパーのフェライト部分は HIP により焼結させる。HIP 処理を行うと、フェライトと下地の銅とを強固に接合させることができるため、フェライトの脱落を防ぐことができる。しかし、フェライトと銅の熱膨張係数の違いにより、冷却に際してフェライトに冷却ひずみがかかることが考えられる。そこで図 9 のようにフェライトのある HOM ダンパー中央部分のみのモデルを製作し、GM 冷凍機を組み込んだ真空冷却装置を用いて冷却サイクル試験を行った。フェライトモデルは GM 冷凍機先端の冷却ステージにセットされる。冷却ステージにはヒーターが取り付けられており、ヒーターの発熱量を制御することにより、室温から約 20K まで自由に温度を制御することができる。室温から 80K まで 72 時間、80K 保持 24 時間、80K から室温まで 72 時間の冷却昇温パターンで冷却･昇温を行い、真空槽から取り出したフェライトモデルの表面をカメラで観察した。

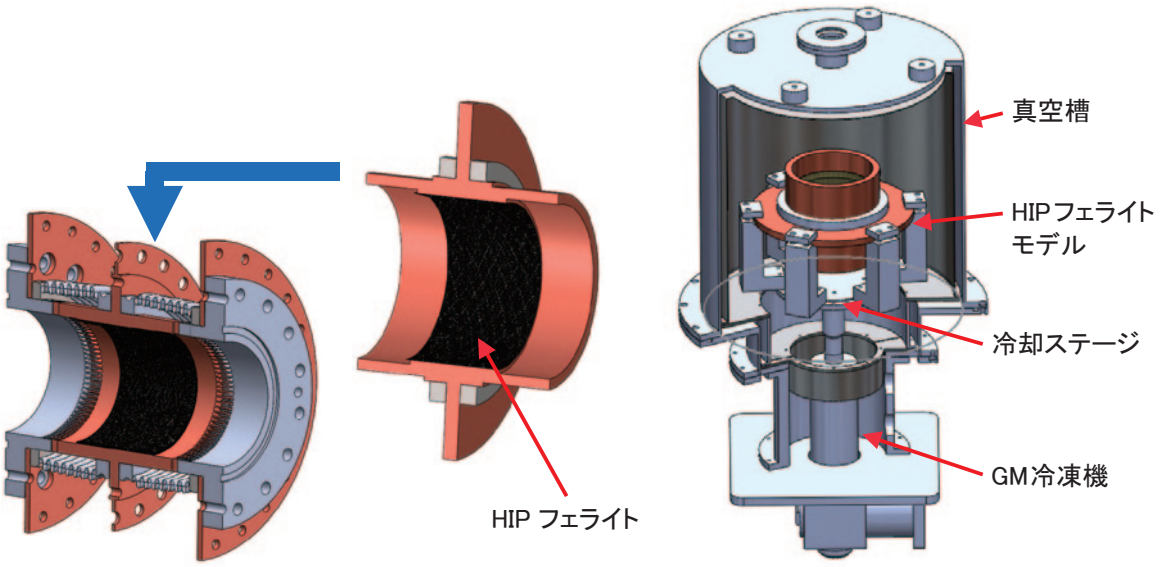


図９　フェライトモデルと冷却サイクル試験のセットアップ概略図

1 回目の冷却サイクルの後のフェライト表面の様子を図 10 に示す。フェライトは厚さ 2mm、長さ 80mm に加工されているが、両端 10 mmの部分は厚さが 2mm から 1mm に変化するテーパー状に加工されている。図 10 はこのテーパー部分であるが、いくつかのクラックが起きている。ただし、クラックは起きているが、フェライト片が欠落するということは起きていない。両端の部分はひずみによる力がかかり易く、クラックが起こったものと思われる。そこで対策として、実機ではフェライト厚さを 2mm から 3mm と厚くし、両端のテーパーを止め、角を丸め加工にすることとした。

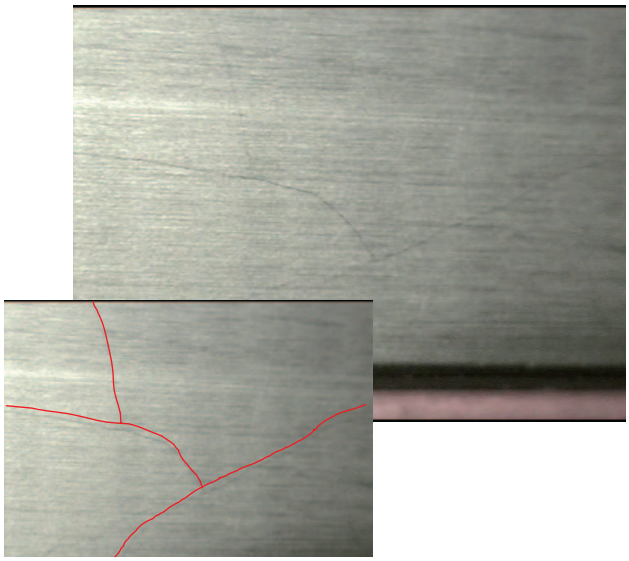


図 10　冷却サイクル後のフェライト表面の様子（上）、下図の赤い部分がクラックの起こった場所を示している

以上の結果を基に櫛歯およびフェライトの加工変更を行って、CW 型超伝導加速空洞モジュールに取り付ける HOM ダンパーの製作を行った。

4. 次年度の予定

次年度は製作した HOM ダンパーを CW 型超伝導加速空洞モジュールに組み込み、超伝導加速器としての総合性能試験を行う予定である。

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）

参考文献（2011 年度中の発表および掲載論文）

[1]　“Development of a 500-kV dc gun”（口頭）, N. Nishimori, R. Nagai, R. Hajima, The 12th Symposium on Advanced Photon Research, Kizugawa, Japan, 2011 年 5 月 .

[2]　“Ultimate performance of modern electron sources”（口頭、招待講演）, N. Nishimori, Ultra Bright Electron Sources Workshop, Cockcroft Institute, Daresbury, UK, 2011 年 6 月 .

[3]　“Cooling Properties of HOM absorber model for cERL in Japan“（ポスター）, M. Sawamura,

T. Furuya, H. Sakai, K. Umemori, K. Shinoe, C. Enrico, 15th International Conference on RF Superconductivity (SRF 2009) Chicago, USA, 2011 年 7 月 .

[4] “High Power Tests of KEK-ERL Input Coupler for Main Linac under Liquid Nitrogen Condition”（ポスター）, H. Sakai, T. Furuya, K. Umemori, K. Shinoe, M. Sawamura, C. Enrico 15th International Conference on RF Superconductivity (SRF 2009) Chicago, USA, 2011年7月 .

[5] “VERTICAL TEST RESULTS ON KEK-ERL 9-CELL L-BAND SUPERCONDUCTING CAVITY”（ポスター）, E. Cenni, T. Furuya, H. Sakai, K. Umemori, M. Sawamura, K. Shinoe, 15th International Conference on RF Superconductivity (SRF 2009) Chicago, USA, 2011年7月 .

[6] “Construction of cERL Cryomodules for Injector and Main Linac”（口頭）, K. Umemori, T. Furuya, E. Kako, S. Noguchi, H. Sakai, M. Satoh, T. Shishido, K. Watanabe, Y. Yamamoto, E. Cenni, M. Sawamura, K. Shinoe 15th International Conference on RF Superconductivity (SRF 2009) Chicago, USA, 2011 年 7 月 .

[7] “ERL 主ライナックのためのカプラー開発 ― 試作カプラー 1 号機におけるハイパワー試験 ―”（ポスター）, 篠江憲治 , 阪井寛志 , 梅森建成 , E. Cenni, 沢村勝 , 中村典雄 , 古屋貴章 , 第 8 回日本加速器学会年会 , つくば , 2011 年 8 月 .

[8] “500-kV 光陰極 DC 電子銃の開発 ”（口頭）, 西森信行 , 永井良治 , 羽島良一 , 山本将博 , 宮島司 , 本田洋介 , 飯島北斗 , 栗木雅夫 , 桑原真人 , 奥見正治 , 中西彊 , 第 8 回日本加速器学会年会 , つくば , 2011 年 8 月 .

[9] “ 次世代 ERL 光源のための 500kV 光陰極電子銃開発の現状 ”（口頭）, 西森信行 , 永井良治 , 羽島良一 , 山本将博 , 宮島司 , 本田洋介 , 飯島北斗 , 栗木雅夫 , 桑原真人 , 奥見正治 , 中西彊 , 日本原子力学会 2011 年秋の大会 , 北九州 , 2011 年 9 月 .

[10] “Status of 500-kV DC Gun at JAEA”（口頭）, N. Nishimori, R. Nagai, R. Hajima, M. Yamamoto, T. Miyajima, Y. Honda, H. Iijima, M. Kuriki, M. Kuwahara, S. Okumi, T. Nakanishi, The 50th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs (ERL2011), Tsukuba, Japan, 2011 年 10 月 .

[11] “HOM properties of main linac for cERL in Japan”（口頭）, M. Sawamura, T. Furuya, H. Sakai, K. Umemori, M. Sato, K. Shinoe, C. Enrico, 50th Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs (ERL ’11) Tsukuba, Japan, 2011 年 10 月 .

[12] “Development of main linac cavity for cERL project”（口頭）, K. Umemori, T. Furuya, H, Sakai, M. Satoh, K. Shinoe, M. Sawamura, E. Cenni, 50th Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs (ERL ’11) Tsukuba, Japan, 2011 年 10 月 .

[13] “Development of input coupler for cERL main linac”（口頭）, H. Sakai, T. Furuya, M. Sato, K. Shinoe, E. Cenni, K. Umemori, M. Sawamurav, 50th Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs (ERL ’11) Tsukuba, Japan, 2011 年 10 月 .

[14] “Performance Evaluation of KEK Tuner”（口頭）, K. Enami, T. Furuya, H. Sakai, M. Sato, K. Shinoe, K. Umemori, E. Cenni, M. Sawamura, 50th Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs (ERL ’11) Tsukuba, Japan, 2011 年 10 月 .

[15] “Vertical test diagnostics and simulation studies for 9-cell cERL cavities”（口頭）, E. Cenni, T. Furuya, H. Sakai, K. Umemori, K. Shinoe, M. Sato, M. Sawamura, 50th Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs (ERL ’11) Tsukuba, Japan, 2011 年

10 月 .
[16] “Status of photoemission DC gun development at JAEA”（口頭）, N. Nishimori, R. Nagai, R. Hajima, M. Yamamoto, Y. Honda, T. Miyajima, H. Iijima, M. Kuriki, M. Kuwahara, S. Okumi, T. Nakanishi, ICFA Workshop on Future Light Sources (FLS2012), Newport News, VA, USA, 2012 年 3 月 .
[17] “ 高輝度電子銃開発状況 ”（口頭）, 西森信行 , 永井良治 , 羽島良一 , 山本将博 , 本田洋介 , 宮島司 , 飯島北斗 , 栗木雅夫 , 桑原真人 , 奥見正冶 , 中西彊 , 第 29 回 PF シンポジウム , つくば , 2012 年 3 月 .
[18] “ 次世代 ERL 光源のための 500kV 光陰極電子銃開発 ”（口頭、シンポジウム「次世代放射光源への期待」), 西森信行 , 永井良治 , 羽島良一 , 山本将博 , 本田洋介 , 宮島司 , 飯島北斗 , 栗木雅夫 , 桑原真人 , 奥見正冶 , 中西彊 , 日本物理学会第 67 回年次大会 , 関西学院大 , 2012 年 3 月 .
[19] “Development of main linac module for Compact ERL project（ポスター）, K. Umemori, T. Furuya, H. Sakai, T. Takahashi, K. Shinoe, M. Sawamura, Proc. of XXV Linear Accelerator Conference (LINAC10), 2010 年 9 月 .
[20] “Development of a 500-kV Photo-Cathode DC Gun for ERL Light Sources, N. Nishimori, R. Nagai, R. Hajima, M. Yamamoto, T. Miyajima, Y. Honda, T. Muto, H. Iijima, M. Kuriki, M. Kuwahara, S. Okumi, T. Nakanishi, Proc. of XXV Linear Accelerator Conference (LINAC10), 2010 年 9 月 .
[21] “Development of a 500-kV photocathode DC gun for ERLs, N. Nishimori, R. Nagai, H. Iijima, R. Hajima, M. Yamamoto, T. Miyajima, T. Muto, Y. Honda, M. Kuriki, M. Kuwahara, S. Okumi, T. Nakanishi, J. Phys.:Conf. Ser. 298, 012005 (2011). 2010 年 10 月 .
[22] 500-kV 光陰極 DC 電子銃の開発 , 西森信行 , 永井良治 , 羽島良一 , 山本将博 , 宮島司 , 本田洋介 , 飯島北斗 , 栗木雅夫 , 桑原真人 , 奥見正冶 , 中西彊 , 第 8 回日本加速器学会年会論文集 , MOPL05 (2011)2011 年 8 月 .

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

超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源における、パルスレーザー蓄積装置開発を推進する。レーザー・電子散乱による高輝度光子源の小型化のためには、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ことが重要である。本課題は、そのための3次元4鏡リング型レーザーパルス蓄積共振器の開発である。平成23年度は、前年度に製作した共振器のKEK－ATF加速器への導入を行った。平成20年度の研究において見いだした新しい共振器制御システムを応用し、レーザー蓄積とガンマ線生成に成功した。また、平成23年度に設置した高時間分解能ガンマ線検出器を改良し、時間分解能の向上行った。これらと平行して共振器のデジタル制御システムの開発を行い、試験装置におけるレーザー蓄積に成功した。また制御パラメータの動的変更などKEK-ATF加速器における利用のためのプログラム開発を行った。

1. 平成23年度開発事業

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。レーザーと電子の散乱頻度を上げ、生成するX線強度を増大するためには、共振器におけるレーザー蓄積率の向上、及び共振器内のレーザー・電子衝突点におけるレーザーの集光を行う必要がある。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）の開発を行っている。平成23年度は、平成22年度に設計・製作を行った3次元4鏡共振器をKEK－ATF加速器（以下ATF）に設置した。さらに広島大学において開発試験を継続していた、3次元4鏡共振器の偏向特性を利用した新しい制御方法を同共振器に応用し、加速器運転条件下においてレーザーパルスの蓄積を達成した。これによって、ATFにおいて3次元4鏡共振器を用いたレーザー・電子散乱によるガンマ線生成に初めて成功した。さらに平成22年度に構築した、ATFの多バンチ電子線によって生成される5.6ns間隔の光子を分離して測定するための高速測定器システムを改良し、時間分解能の向上を図った。これらと平行して、広島大学において、デジタル方式による共振器制御装置の開発を継続した。まず、2鏡共振器を用いたデジタルシステムの動作試験を用いてこの方式によるレーザー蓄積の動作を確認した。さらに制御パラメータの動的な設定など、ATF加速器におけるガンマ線生成への導入を念頭にした開発を行い、その目処をたてるに至った。

平成23年3月11日発生した東日本大震災によるATFも損傷をうけたが、本プロジェクトの機器への損傷はなく、ATFが復帰した同年6月には装置の動作を確認することができた。また12月以降はほぼこれまでと同じ状態による実験研究が可能となっている。

3次元4鏡共振器：本体の開発

本年度は、平成22年に製作した3次元4鏡共振器をKEK-ATF加速器に導入した。共振器の設計の詳細は平成22年度の報告書に記載しているが、レーザーと電子線の衝突点において、レーザー光を15μm程度に安定して集光できることが期待されている。

図1は製作したレーザー蓄積共振器である。この共振器に取り付けた鏡の反射率は、レーザー入射側が99.90%、その他の3つの鏡が99.99%である。これから計算されるフィネスは4830、またレーザー強度の増大率は1890となる。2011年8月にこれまでガンマ線生成実験に使っていた2鏡共振器を

ATF 加速器から取り外し、4 鏡共振器用の真空容器を取り付けた。図 2 は真空容器内に共振器を設置した写真である。

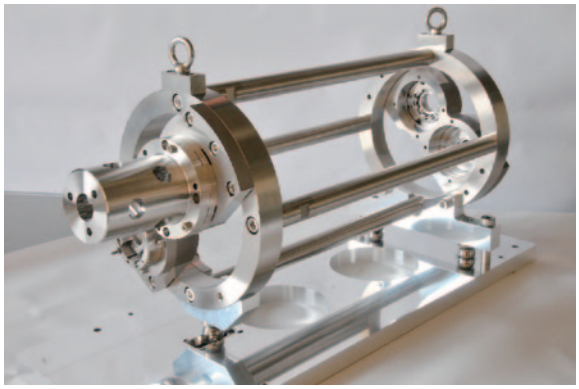


図 1　作製した 3 次元 4 鏡共振器

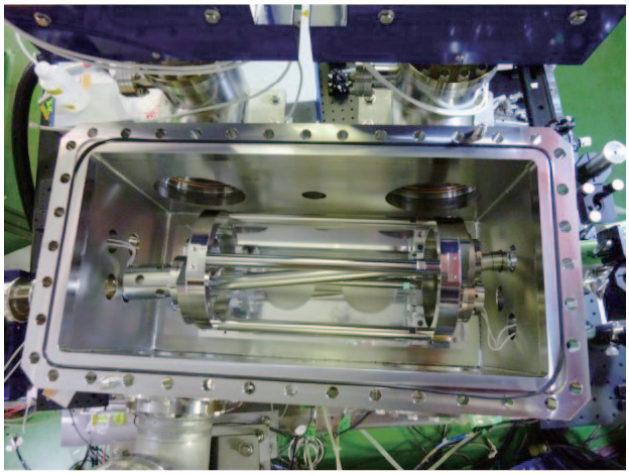


図 2　ATF 加速器に設置した 3 次元 4 鏡共振器を真空容器に設置した写真

その後、真空容器をいったん取り外し、真空対応のための共振器本体の洗浄、真空容器への設置を行った。さらに、光学系の整備、制御システムの試験（後述）を行った。最終的に真空容器内を真空に引いた状態でレーザー蓄積を確認し、2011 年 11 月に ATF 加速器と接続した。ATF 加速器に接続した状態で、真空容器内の真空度は 10^{-6}Pa を達成し、ATF 加速器の運転に支障が無いことを確認できている。

図 3 は加速器接続後に行った共振試験の結果である。共振器長を変化させながら、入射レーザー光に対する共振の様子を観測している。共鳴の幅と共鳴ピークの間隔から算出されたフィネスは 5800 である。鏡の反射率からの単純計算では約 4800 だが、反射率が製造業者の保証値であることを考慮すると、測定と計算に矛盾はないと考えられる。以上の作業により、新しく製作した 3 次元 4 鏡共振器を ATF 加速器に設置し設計通りの性能を得たことを確認できた。

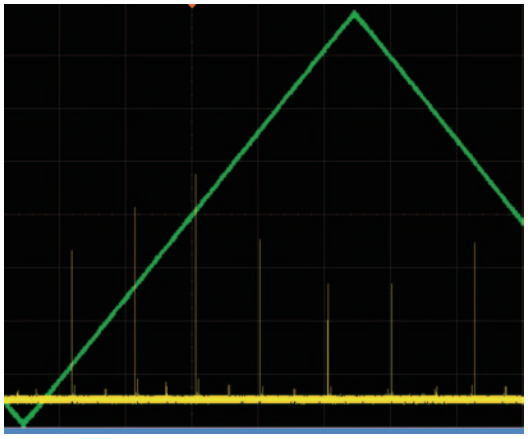


図３　共振器にレーザーを入射し測定した共振状態の測定。
共振器に接続したピエゾ素子にかける電圧を変化させながら、透過光（黄線。共振器内に蓄積されるレーザー強度に対応）をオシロスコープで観測した。横軸は共振器の周長に対応する。緑線は、ピエゾ素子に印可した電圧。透過光のピークが共振器の共鳴に対応する。

3 次元 4 鏡共振器の開発：共振器制御

前述のように本共振器では、平成 20 年度の研究において見いだした、共振器におけるレーザーの偏光状態を利用したフィードバック制御方法を採用している。

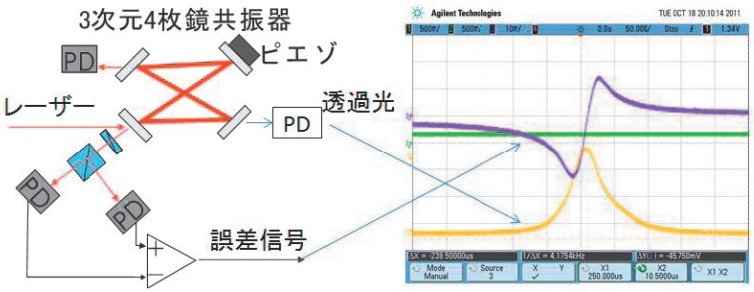


図４　変更特性を利用した誤差信号（共振器制御信号）の取得。
共振器長を変化させながら、透過光と誤差信号を観測したもの。透過光が最大（共鳴状態）近傍で透過光強度に比例した信号をえることができている。

これは、3 次元 4 鏡共振器がその特性上、左右どちらかの円偏向状態のみに共振することを利用したものである。図 4 にこの方式を用いた制御の基本構成とそれによって得られる制御信号を示す。

平成 22 年度までに、試験用の 4 鏡共振器を使った原理検証を行い、動作を確認した。平成 23 年度もまず同様の試験システムを用いて、フィードバック制御の基本特性の調査を行い、その結果をもとに ATF 加速器に導入した新共振器のフィードバック制御を行った。共振器のフィネス 5800（レーザー強度の増大率にして約 1900）は、共鳴幅 87pm（FWHM）に対応する。したがって、レーザーパルスを共振器内に共鳴蓄積するためには、共振器の周長（1.64m）を 10pm 程度の精度で一定に保つ必要がある。

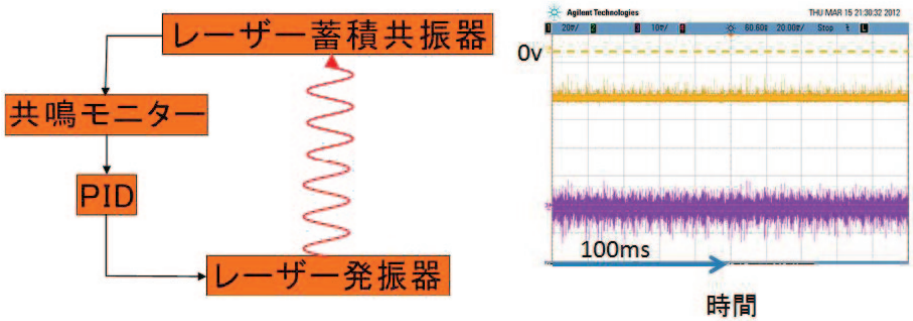


図５　共振器制御の様子　左図は、共振器制御の構成図。
右図はそれによって得られた透過光強度（黄線）と誤差信号（紫線）を示す。レーザーが共振していない状況での、透過光強度の基準線（0v）を右図点線で示している。制御機構によって透過光、誤差信号ともに一定に保たれていることが分かる。

図５に共振器制御の構成図（左）とそれによって共振状態の維持を行った様子を示す。これから共振器の周長を一定に保ち、レーザーパルスを蓄積できていることが分かる。透過光強度から換算した、共振器内のレーザー蓄積強度は 740W である。

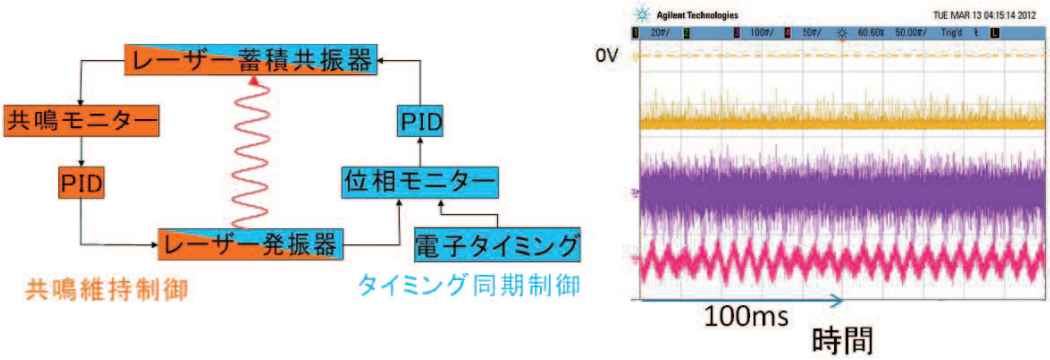


図６　電子バンチとの時間同期を含む制御機構の構成（左）とそれを用いた制御結果（右）。
黄線、紫線は図５と同様。赤線は電子バンチとレーザーパルスの同期精度を表す。赤線の揺らぎから、同期精度は 4.5ps と換算できる。

レーザー光と電子を衝突させてガンマ線を生成するためには、レーザーパルスを蓄積した状態で、さらに電子線と同期しなければならない。そのための同期回路を加えた場合の構成が図６（左）である。この状態で制御を行った結果を図7(右)に示している。レーザーパルスの蓄積状況は図6と同様である。それに加えて、電子線とレーザーパルスの同期が 4.5ps の精度で達成できている。これはレーザーパルスの長さ約 10ps、ATF 電子のバンチ長約 30ps に比べて十分に短く、レーザー・電子散乱に十分な精度で同期できていることを示している。

3 次元 4 鏡共振器の開発：ガンマ線生成

以上の準備のもとに、2011 年 12 月より ATF 加速器において、新しい 3 次元 4 鏡共振器を用いてガンマ線生成実験を行った。

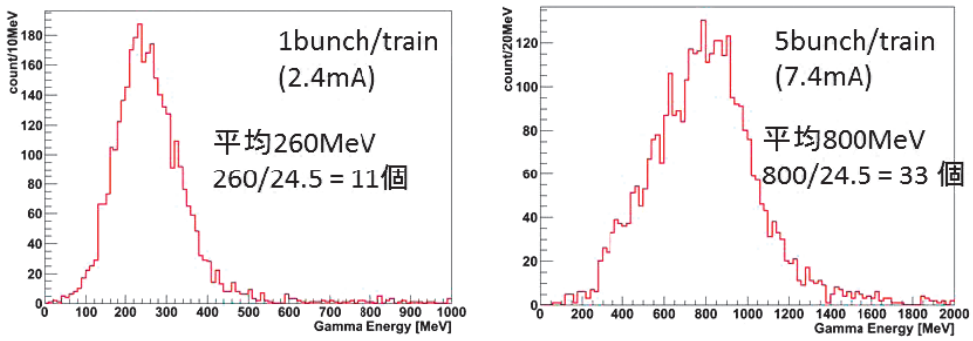


図７　レーザー・電子散乱によるガンマ線のエネルギー分布。
ATF 加速器が１バンチ運転の場合（左）と５バンチ運転の場合（右）

図７（左）は ATF が１バンチ運転時に観測された生成ガンマ線のエネルギースペクトルである。観測されたエネルギーの平均値 260MeV に対して、ATF のエネルギー 1.3GeV の電子とレーザーの衝突よって生成されるガンマ線の平均エネルギーは 24.5MeV である。このことから、レーザーパルスと電子バンチの一回の衝突で平均 11 個のガンマ線が生成されたことが分かる。図７（右）は ATF が５バンチ運転時に取得したガンマ線のエネルギー分布である。エネルギーの平均値 800MeV から換算されるレーザーと電子５バンチの衝突におけるガンマ線生成数は、平均 33 個となる。１バンチ時の生成数とは電子線の電流比 7.4/2.4 ～ 3.1 と矛盾の無い数である。

図８は、レーザーパルスと電子バンチの垂直方向の相対位置変化させながらガンマ線の生成量を測定した結果である。観測されたガンマ線生成数分布の幅 18μm は、電子バンチの垂直方向と大きさとレーザーパルスの大きさの畳重である。電子バンチの大きさは ATF の運転状態から 10μm だったことが分かっている。したがって、電子とレーザーの衝突点におけるレーザーパルスの大きさは 15μm と推定できる。本共振器ではレーザーを 15μm に集光することを目標として設計されており、それを達成できている。

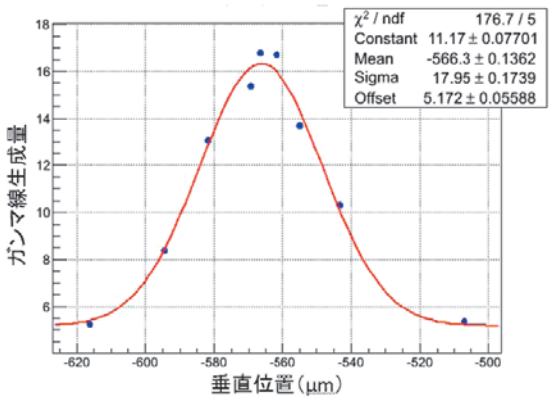


図８　レーザーと電子線の垂直相対位置とガンマ線生成数。

ガンマ線生成についてもう一つの重要な点は、多バンチからのガンマ線生成をモニターすることである。レーザー・電子散乱による光子生成では、多バンチ構造の電子線とレーザーを衝突させ、それによって光子生成の高強度化を図る。ATF では 5.6ns 間隔の電子バンチを最大 10 バンチまで周回させることができる。多バンチ生成のモニターの目的は、バンチからの光子生成数を測定し、光子が各バ

ンチから均等に生成されていることを確認することである。

平成 22 年度にガンマ線検出器をフッ化バリウム（BaF2）シンチレーターと高速の光電子増倍管（浜松ホトニクス H3378-51）に変更し、各バンチからのガンマ線を検出可能とした。しかし、その時点では、フッ化バリウムの遅い蛍光成分の混入が残っていたこと、その影響で光電子増倍管の印可電圧を適正値にできなかったことから、時間分解能に改善の余地があった。そこで、平成 23 年度に遅い成分を遮断するフィルターの交換などの改善をおこなった。図 9 に改良前後の 1 バンチからのガンマ線信号の波形を示す。

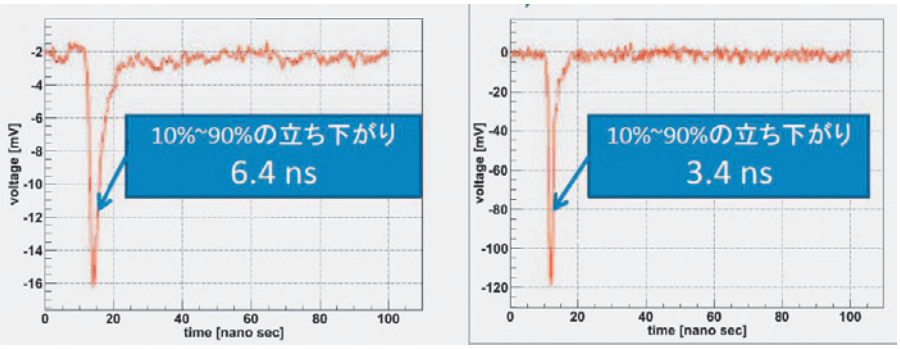


図 9　ガンマ線検出器改良前（左）後（右）の検出器信号の観測図。

信号の立ち上がり、立ち下がりともに改善していることが分かる。多バンチ運転時の波形観測については、検出器の時間分解能向上に対応して、検出システムに対するトリガー信号の揺らぎの改善が必要である。この改良を行い、平成 24 年度前半にデータを蓄積する予定である。

3 次元 4 鏡共振器の開発：デジタル制御技術開発

ATF における 3 次元 4 鏡共振器とそれによるガンマ線生成実験と平行して、共振器をデジタル制御するための技術開発を行っている。これは、現在アナログ PID 回路を用いて行っている制御信号の生成を、より自由度が高くかつ多入力・多出力に対応できるデジタルシステムに変更することによって、制御の柔軟性・冗長性に対応できるようにすることを目的としている。平成 23 年度は、広島大学において、2 鏡共振器を用いたデジタルフィードバックの試験を行った。試験に用いたデジタル DA － AD ボードは 4DSP 社の FM485-ADC250 である。これを用いてデジタル PI 制御回路を作製した。図 10 に試験構成図をこれをつかって、2 鏡共振器を制御した結果を図に示す。これは、デジタルシステムを用いた共振器制御の基礎技術開発ができていることを示している。

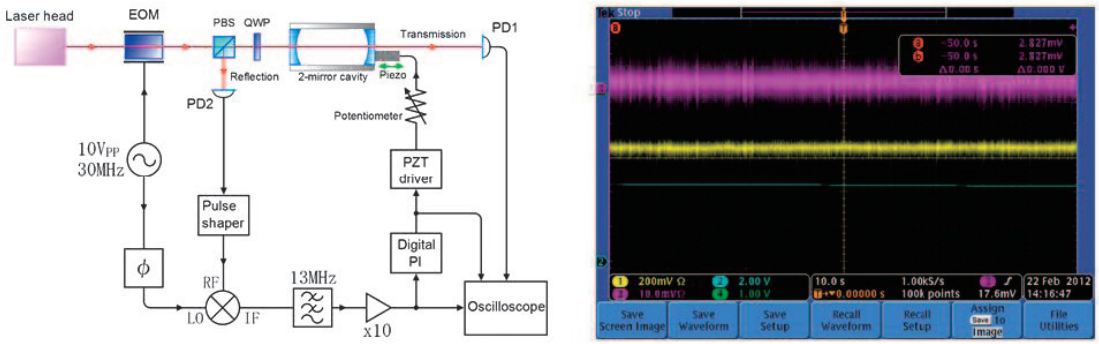


図 10　デジタル制御試験構成（左）とそれによる試験結果（右）。
紫が誤差信号。黄色が透過光強度である。透過光強度を一定に保つように制御できている。

ATF 加速器環境下における応用の際には、実際の運転や環境条件にあわせて、制御のパラメータを最適化する必要がある。そのため、PI 回路のパラメータを動的に変更できるようにプログラムを開発し、さらにそのためのユーザーインターフェースを作製した。図 11 は作製したプログラムを動作させている状況である。

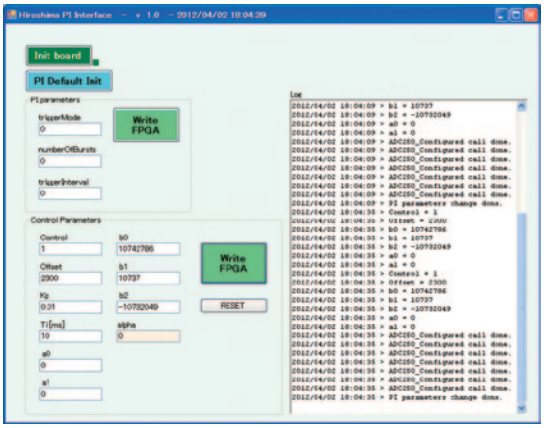


図 11　パラメータの動的変更に対応したユーザーインターフェースの動作図

2. 平成 23 年度のまとめと 24 年度計画

平成 23 年度に行った開発事項は以下の通りである。

3 次元 4 鏡共振器開発について、

- 3 次元 4 鏡共振器を製作し ATF 加速器に設置した。
- 共振器中のレーザーの偏光状態をもちいた新しい制御方式を用いて ATF に設置した新型共振器成功した。
- 新型共振器によるガンマ線生成に成功した。さらに、ガンマ線検出器の時間分解能向上を行い、多バンチからのガンマ線をより明確に分離することが可能となった。

デジタル制御システムについて

- デジタル方式による PI 制御回路を作製し、レーザー蓄積システムの構築を行った。さらに実際の加速器運転に対応するためのパラメータの動的変更プログラムを作成した。

以上を踏まえ平成 24 度は以下の項目の推進を予定している。

- ATF に設置した新 4 鏡共振器によるガンマ線生成データを系統的に取得し、レーザーと電子線双方の運転状況と比較することによって、ガンマ線量、多バンチガン線生成の定量的な評価を行う。（平成 24 夏）
- 広島大学において開発したデジタル制御システムを ATF 加速器におけるガンマ線生成に導入する。（平成 24 年秋）
- 上記 2 項目の達成状況によって、共振器の鏡をさらに高反射率のものに交換しガンマ線の高輝度化を図る

開発スタッフ

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

参考文献（2011 年度中の発表および掲載論文）

［1］赤木智哉、Development of the 4-mirror Compton cavity
日本加速器学会　2011 年 8 月

［2］赤木智哉、Development of the 4-mirror Compton cavity
PosiPol2011　2011 年 8 月　北京

［3］赤木智哉、ILC 偏極陽電子源の為の 3 次元 4 枚鏡共振器を用いたガンマ線生成実験
日本物理学会 2011 年秋季大会　弘前市

［4］赤木智哉、ILC 偏極陽電子源の為の 4 枚鏡共振器の開発共振器設計と設置
日本物理学会第 67 回年次大会

［5］田中龍太、3 次元 4 枚鏡共振器における円偏光蓄積特性を用いたフィードバックの実現
日本物理学会 2011 年秋季大会　弘前市

［6］田中龍太、ILC 偏極陽電子源の為の 4 枚鏡共振器の開発 共振器の共鳴維持制御技術
日本物理学会 2011 年秋季大会　弘前市

［7］高橋　徹、Muti banchi generation Experiment at ATF
PosiPol2011　2011 年 8 月

［8］高橋　徹、Status of Hiroshima-KEK Compton Experiment at ATF
LCWS2011　2011 年 9 月

［9］T. Akagi, S. Araki, J. Bonis, I. Chaikovska, R. Chiche, R. Cizeron, M. Cohen, E. Cormier, P. Cornebise, N. Delerue, R. Flaminio, S. Funahashi, D. Jehanno, Y. Honda, F. Labaye, M. Lacroix, R. Marie, C. Michel, S. Miyoshi, S. Nagata, T. Omori, Y. Peinaud, L. Pinard, H. Shimizu, V. Soskov, T. Takahashi, R. Tanaka, T. Terunuma, J. Urakawa, A. Variola, F. Zomer “Production of gamma rays by pulsed laser beam Compton scattering off GeV-electrons using a non-planar four-mirror optical cavity”, Journal of Instrumentation,　Vol7 No1 P01021

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を進めている。本計画では、1.3GHz 9セル超伝導空洞2台からなるクライオモジュールを平成23年度に完成させ、平成24年度に高電界運転とビーム加速運転を行い、高フラックスX線を生成する事を目指して開発する。超伝導加速空洞はビームのウェーク場の影響を受けにくい大きなビームアパーチャーの空洞であり、なおかつ超伝導を利用し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23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、小型高フラックスX線源用ビームラインをその下流に設置したことである。このような小型加速器の設置に1年を費やし、ビーム生成、加速、X線生成という実証試験の準備を綿密に行った。次年度の目標は、これまでに開発された技術を総合的に組み合わせたこの小型加速器を実際に運転し、高精度なビーム加速を行って高フラックスX線生成を実証する事である。

1. 9セル超伝導空洞を用いた電子加速器の設計、組立、設置

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。ニオブ板材のプレス成形や電子ビーム溶接という製造過程で内面の平滑度を保ち、傷や溶接スパッターボール、溶接ピットなどを生じさせない事が重要であり、製造後の表面処理において電界放出を誘導するような異物や微小粉塵の付着を無くする事が重要である。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 最小とする超純水高圧洗浄手順を採用、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、加速モジュールに使用する2台の9セル加速空洞の性能が40MV/m、33MV/mという高電界まで上げる事ができた。また､それらを内蔵させる加速モジュールというクライオスタット製作を行なってきた。今年度は、それらの空洞を加速モジュールに組み込む工程を行い、加速モジュールを実験室となる地下トンネルに設置した。空洞の組み込みにも徹底した清浄化をおこなって空洞内部に塵芥の混入のない組立を実践した。また、同時に、2K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。

図１　超伝導空洞２台を内包する横置きクライオスタットの組立写真。連結が終了しクリーンルームから取り出された２台の超伝導空洞（左上の写真）。ガスリターンパイプに吊るされアライメント調整中（右上の写真）。地下トンネルに設置中の加速モジュール（左下）。加速モジュールベローズを閉じて完成させるところ（右下の写真）。

2. 超低エミッタンス電子ビームを生成する RF 電子銃の開発

ビームを小さく絞りレーザーとの衝突を効率良く行うためには、超低エミッタンス電子ビームを生成しなければならない。そのような電子ビームの生成に、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。この電子銃により超伝導空洞による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。

22 年度では、電子銃空洞のパルス RF 運転試験を行い、空洞洗浄と RF プロセスをして暗電流評価を行った。また、高輝度 X 線を効率良く発生させる加速器の設計を詳細に行い、電子ビーム加速器のコンポーネント製作を行った。引き続く 23 年度では、フォトカソード生成部の製作と評価、フォトカソード用レーザーの組立、加速モジュールを含むビームラインの総合組立、RF 電子銃部の総合組立を行った。そして 23 年度末には電子ビーム発生部の総合運転を行った。

Cs_2Te フォトカソード蒸着槽は電子銃空洞に挿し込むタイプのカソードブロックの表面に Te を膜厚計測しながら蒸着し、その後に Cs を量子効率計測しながら蒸着をするシステム（図 2）である。これら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たシステムである。図 3、図 4 にはフォトカソードの生成の様子を示したが、4% の量子効率を持つ Cs_2Te 膜が生成できている。

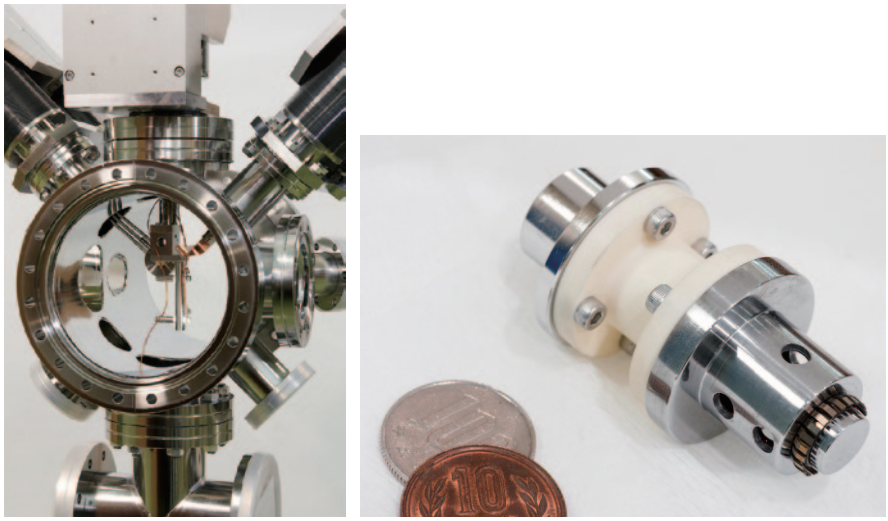


図２　フォトカソード蒸着槽の全景写真（左側）。右側にはカソードブロックの写真を示す。カソードブロックはモリブデン製である。

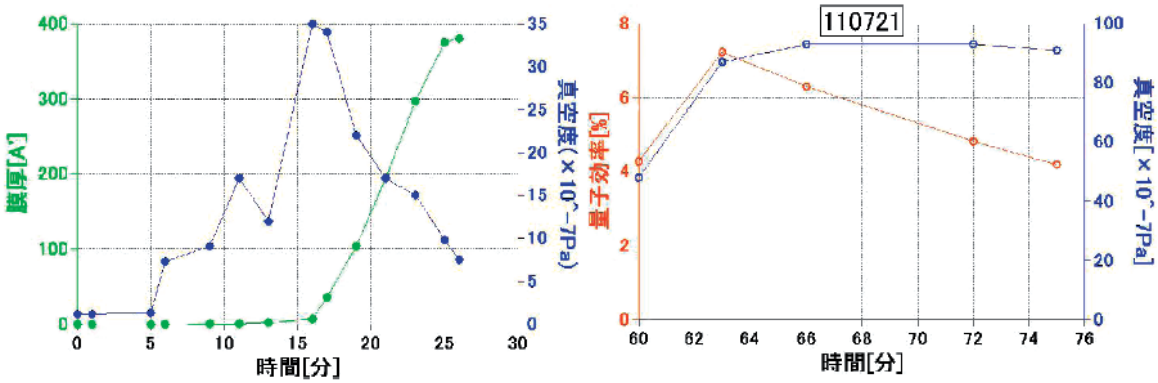


図 3. Te成膜　　図 4. Cs蒸着

図３、図４　フォトカソードの生成の様子。図３は Te 膜の 40nm までの蒸着の様子を示し、図４は UV 光を当てながら出てくる光電子の個数を量子効率で表した Cs 蒸着の様子を示している。量子効率はピークで 7%、その後 4% 程度まで落ちている事が見てとれる。

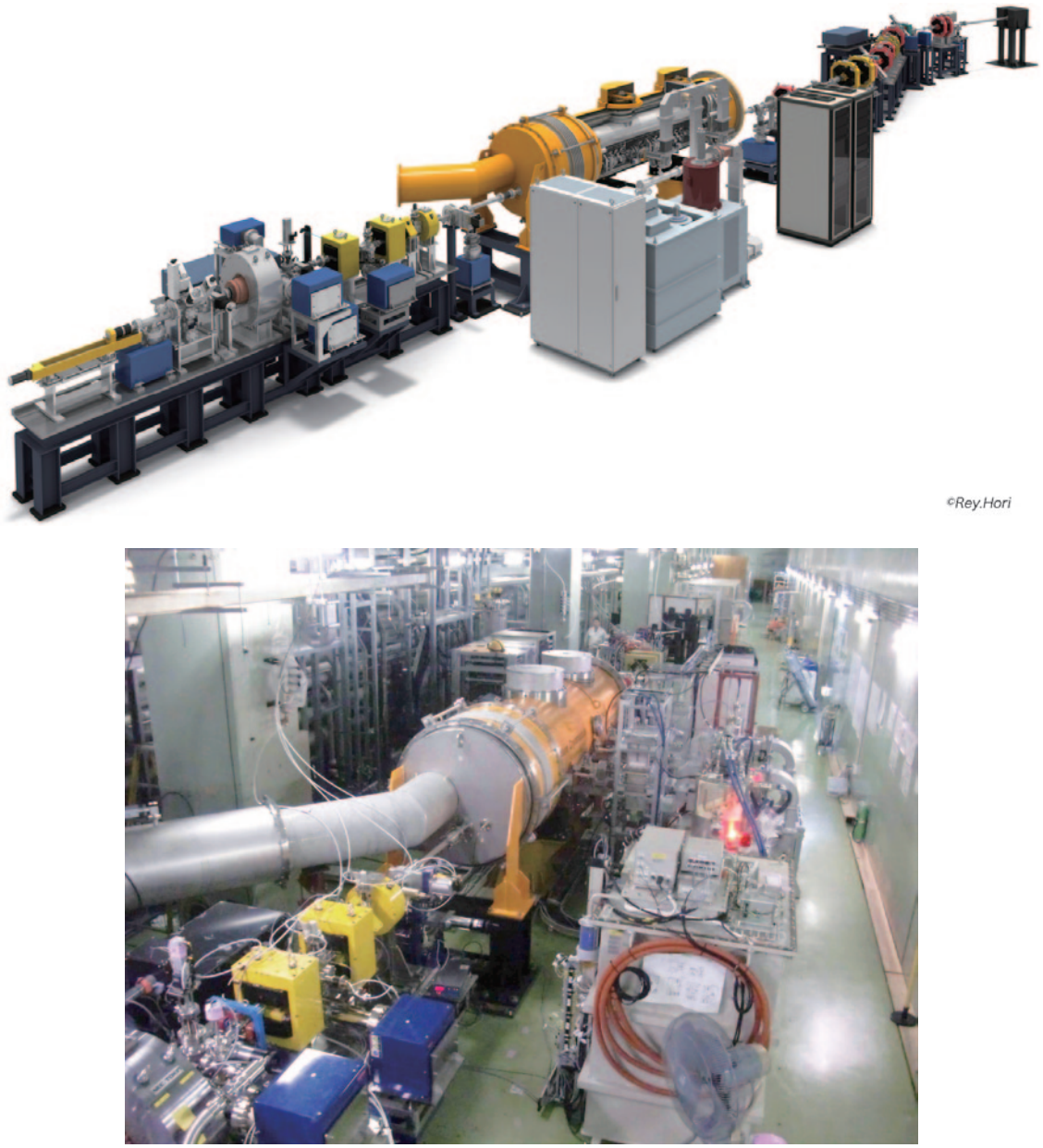


図５　組み上がった超伝導加速器の様子。イラスト（上）と実際の加速器写真（下）。

組み上げられた超伝導電子加速器のわかりやすいイラストと実際の写真を図５に示す。この加速器の加速モジュールは 2012 年２月には冷却試験が開始され、３月には内包されている加速空洞の絶対温度２度における各種調整作業に入っている。並行して、大電力 RF 系の準備も行われ、クライストロン単体での各種試験も終了している。ビームラインのマグネットのアライメントは終了していて、通電試験も終了している。

RF 電子銃は 2012 年２月末から電子ビーム取り出し試験を行った。これは、各機器が正常に動作している事の確認のためと、ビーム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。まず、RF パルス幅を 20μs という短パルスにして、35 バンチのビーム取出し試験を行った結果を図６にしめす。その後、RF パルス幅を伸ばし、ビームトレイン長を伸ばす調整をおこなって、図７に示すように、設計値の 1ms トレイン長のビーム引出しに成功した。引出し電流値もフラットで

はないが十分に設計値の62pC/bunchをクリアーしている。フラットな強度のビームトレイン引出しは、今後追求していく課題である。

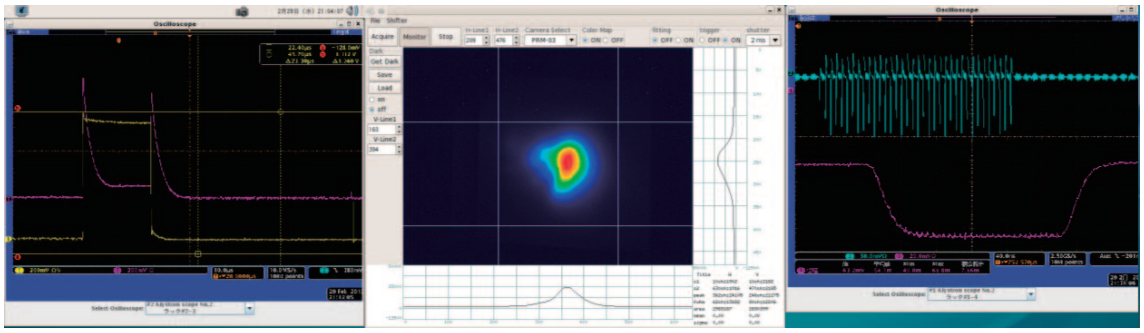


図６　20μsのRFパルス幅で、35バンチの電子ビーム発生試験の様子。空洞に入るRF波形と反射波形（左）、取り出されたビームのプロファイル（中央）、ビーム位置モニター信号でみる電子ビームと積分型電流モニターの波形（右）。

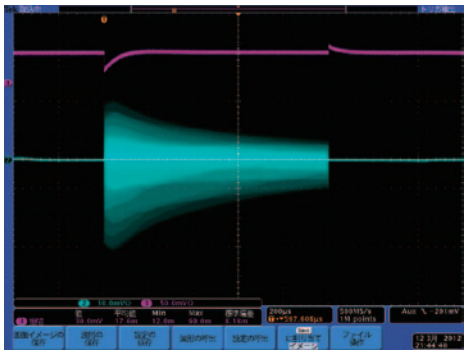


図７　設計の1msビームトレイン長でビーム取り出した時の様子。青のトレースがビーム位置モニターの波形信号で、赤のトレースは積分型電流モニター。（積分型電流モニターは時定数が小さいため、長トレインでは電流を計測できない。長トレインでは別のモニターを使用する予定。）

3.　総括

平成23年度の最も重要な成果は、高フラックスX線源試験に使用する40MV/mという高電界の9セル空洞を加速モジュールに組み込んだ事、加速モジュールを含め加速器を構築し、冷却運転を開始し、RF電子銃から電子ビーム引出しを行った事である。また、デジタルフィードバックによる超伝導空洞の加速電場の安定化、RF電子銃空洞の加速電場の安定化も準備が進んでいる。これらにより高フラックスX線源試験のための高安定度ビーム加速に問題はない。平成24年度はそのビーム加速を実証し、レーザー蓄積器を運転し、コンプトン散乱による高フラックスX線生成を実証する。

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：渡邊謙、福田将史、杉山陽栄、松本利広、野口修一、加古永治、佐伯学行、山本康史、宍戸寿郎、佐藤昌史（以上　高エネルギー加速器研究機構）、KEK-STF Group（高エネルギー加速器研

究機構)、KEK-ATF Group（高エネルギー加速器研究機構)、栗木雅夫、飯島北斗（広島大学)、坂上和之（早稲田大学)、柏木茂（東北大学）

参考文献（2008 年～ 2011 年）

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

[2] 山本康史、加古永治、佐藤昌史、宍戸寿郎、野口修一、早野仁司、渡邊謙、「STF ベースライン空洞におけるローレンツデチューニングの観測とモデル計算との比較」第 5 回日本加速器学会年会プロシーディング、東広島 (2008) p215-218.

[3] 山本康史、加古永治、佐藤昌史、宍戸寿郎、野口修一、早野仁司、渡邊謙、「KEK － STF における超伝導空洞性能試験（縦測定）設備の構築」第 5 回日本加速器学会年会プロシーディング、東広島 (2008) p888-891.

[4] 田島裕二郎、他：「L バンド超伝導空洞の内面検査システムの開発」、加速器 (41-49) Vol.5 No.1, 2008.

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

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

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

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

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

[10] K. Watanabe, S. Noguchi, E. Kako, T. Shishido, H. Hayano, “New HOM Coupler Design for ILC Superconducting Cavity”, Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Research A 595 (2008) p299-31

[11] Y. Iwashita et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 11, 093501 (2008).

[12] 山本康史　他、「ILC に向けた高電界空洞性能試験のＫＥＫ－ＳＴＦにおける最新結果」第 6 回日本加速器学会年会プロシーディング、東海 (2009).

[13] 菊地洋一郎　他、「空洞内面検査カメラの自動画像取得と欠陥検出」第 6 回日本加速器学会年会プロシーディング、東海 (2009).

[14] 渡邊謙　他、「KEK-STF における超伝導加速空洞の空洞内面検査」第 6 回日本加速器学会年会プロシーディング、東海 (2009).

[15] 宍戸寿郎　他、「ILC/STF 用超伝導空洞の加速モード周波数変化」第 6 回日本加速器学会年会プロシーディング、東海 (2009).

[16] 福田茂樹　他、「KEK 超電導 RF 試験装置 (STF) の RF 源の開発」第 6 回日本加速器学会年会プロシーディング、東海 (2009).
[17] 早野仁司　他、「Status of Superconducting RF Test Facility (STF)」第 6 回日本加速器学会年会プロシーディング、東海 (2009).
[18] 佐藤昌史　他、「TTF − V 入力結合器の大電力試験」第 6 回日本加速器学会年会プロシーディング、東海 (2009).
[19] 頓宮拓　他、「超伝導加速管の縦測定における超多点温度マップ」第 6 回日本加速器学会年会プロシーディング、東海 (2009).
[20] 明本光生　他、「KEK 超伝導加速器試験施設（STF）に於ける 10MW クライストロン用長パルスモジュレータの開発」第 6 回日本加速器学会年会プロシーディング、東海 (2009).
[21] 松本利広　他、「STF Phase-1 におけるデジタル低電力高周波制御系」第 6 回日本加速器学会年会プロシーディング、東海 (2009).
[22] 福田茂樹　他、「KEK 超電導 RF 試験装置 (STF) の RF 源の開発」第 6 回日本加速器学会年会プロシーディング、東海 (2009).
[23] 三浦孝子　他、「STF における低電力高周波源の安定性評価」第 6 回日本加速器学会年会プロシーディング、東海 (2009).
[24] 吉田光宏　他、「STF における導波管コンポーネントによる超伝導空洞のＱ調整」第 6 回日本加速器学会年会プロシーディング、東海 (2009).
[25] 竹中たてる　他、「導波管の電力分配システム（KEK STF）」第 6 回日本加速器学会年会プロシーディング、東海 (2009).
[26] S. Kazakov　他、「L-band waveguide elements for SRF application」第 6 回日本加速器学会年会プロシーディング、東海 (2009).
[27] Y. Yamamoto, H. Hayano, E. Kako, T. Matsumoto, S. Michizono, T. Miura, S. Noguchi, M. Satoh, T. Shishido, K. Watanabe, “Experimental result of Lorentz detuning in STF phase-1 at KEK-STF”, Proc. of SRF2009, Berlin, Germany (2009) TUPPO007.
[28] E. Kako, H. Hayano, S. Noguchi, M. Satoh, T. Shishido, K. Watanabe and Y. Yamamoto, “Cryomodule tests of the STF phase-1 at KEK”, Proc. of SRF2009, Berlin, Germany (2009) TUPPO021.
[29] Y. Iwashita, H. Fujisawa, H. Tongu (Kyoto University), H. Hayano, K. Watanabe and Y. Yamamoto(KEK), “R&D of nondestructive inspection systems for SRF cavities”, Proc. of SRF2009, Berlin, Germany (2009) TUPPO040.
[30] K. Watanabe, S. Noguchi, E. Kako, T. Shishido, Y. Yamamoto, K. Umemori, M. Sato, “SC cavity system for ERL injector at KEK”, Proc. of SRF2009, Berlin, Germany (2009) TUPPO056.
[31] X. Zhao, R. L. Geng (JLAB), Y. Funahashi, H. Hayano, S. Kato, M. Nishiwaki, T. Saeki, M. Sawabe, K. Ueno, K. Watanabe (KEK), “Surface characterization of niobium samples electropolished together with real cavities”, Proc. of SRF2009, Berlin, Germany (2009) TUPPO086.
[32] T. Saeki, Y. Funahashi, H. Hayano, S. Kato, M. Nishiwaki, M. Sawabe, K. Ueno, K. Watanabe (KEK), C. Antonie, S. Berry, F. Eozenou, Y. Gasser, B. Visentin (CEA-Saclay), P.V.Tyagi

(GAUS), W. Clemens, R. L. Geng, R. Manus(JLAB), “R&D for the post-EP process of superconducting RF cavity”, Proc. of SRF2009, Berlin, Germany (2009) THPPO085.

[33] E. Kako, S. Noguchi, M. Satoh, T. Shishido, K. Watanabe, Y. Yamamoto (KEK), H. Jenhani (LAL-Orsay), T. X. Zhao (IHEP), “Advances and performance of input couplers at KEK”, Proc. of SRF2009, Berlin, Germany (2009) THOBAU02.

[34] K. Umemori, T. Furuya, E. Kako, S. Noguchi, H. Sakai, M. Satoh, T. Shishido, T. Takahashi, K. Watanabe, Y. Yamamoto (KEK), K. Shinoe (ISSP-Tokyo), M. Sawamura (JAEA), “Compact ERL Linac”, Proc. of SRF2009, Berlin, Germany (2009) FROAAU04.

[35] K. Watanabe, Proc. 14th Int. Conf. on RF Superconductivity (SRF2009), Berlin, September 2009, TUOBAU01, p. 123.

[36] 竹中たてる　他、「S1-Global の導波管分配システム (KEK ILC)」第 7 回日本加速器学会年会プロシーディング、姫路 (2010).

[37] 明本光生　他、「ILC 計画における分布型 RF 源用電源の開発」第 7 回日本加速器学会年会プロシーディング、姫路 (2010).

[38] 松本利広　他、「KEK 超伝導 RF 試験施設（STF）での S1 Global のための高周波源」第 7 回日本加速器学会年会プロシーディング、姫路 (2010).

[39] 山本康史　他、「国際リニアコライダー計画のための超伝導加速空洞の STF における性能試験の最新結果」第 7 回日本加速器学会年会プロシーディング、姫路 (2010).

[40] 加古永治　他、「S1-Global における TESLA 改良型超伝導空洞のクライオモジュール試験」第 7 回日本加速器学会年会プロシーディング、姫路 (2010).

[41] 早野仁司　他、「STF の状況」第 7 回日本加速器学会年会プロシーディング、姫路 (2010)

[42] 佐藤昌史　他、「STF 超伝導空洞用入力結合器の高周波窓の熱サイクル試験」第 7 回日本加速器学会年会プロシーディング、姫路 (2010).

[43] 頓宮拓　他、「京大における超伝導空胴の品質検査のための研究」第 7 回日本加速器学会年会プロシーディング、姫路 (2010).

[44] 加藤茂樹、他：「超伝導加速空洞の高電界化に向けた研究（その 1)」、加速器学会誌「加速器」Vol.7 No.2, 2010.

[45] 加藤茂樹、他：「超伝導加速空洞の高電界化に向けた研究（その 2)」、加速器学会誌「加速器」Vol.7 No.3, 2010.

[46] K. Watanabe et al., “Repair Techniques of Superconducting Cavity for Improvement Cavity Performance at KEK-STF”, Proc. 1st Int. Part. Acc. Conf. (IPAC2010), Kyoto, May 2010.

[47] E. Kako et al., “Preparation Status of Cryomodule Tests of Tesla-like Cavities in S1-Global Project at KEK”, Proc. 1st Int. Part. Acc. Conf. (IPAC2010), Kyoto, May 2010.

[48] M. Nishiwaki et al., “Surface Study on Niobium Stain after Electro-polishing for Superconducting RF Cavity”, Proc. 1st Int. Part. Acc. Conf. (IPAC2010), Kyoto, May 2010.

[49] M. Sawabe et al., “Long-period Monitoring of Electro-polishing Electrolyte in EP Facility at KEK”, Proc. 1st Int. Part. Acc. Conf. (IPAC2010), Kyoto, May 2010.

[50] K. Watanabe et al., “Surface Inspection on MHI-01~09 Cavities”, Proc. 1st Int. Part. Acc. Conf. (IPAC2010), Kyoto, May 2010.

[51] P. V. Tyagi et al., “Various Rinsing Effects to Mitigate Contaminates Brought by BCP on

Niobium SRF Cavity Surface", Proc. 1st Int. Part. Acc. Conf. (IPAC2010), Kyoto, May 2010.
[52] H. Tongu et al., "Multipoint T-map System for Vertical Test of the Superconducting Accelerator Cavities", Proc. 1st Int. Part. Acc. Conf. (IPAC2010), Kyoto, May 2010.
[53] N. Ohuchi et al., "Construction of the S1-Global Cryomodules for ILC", Proc. 1st Int. Part. Acc. Conf. (IPAC2010), Kyoto, May 2010.
[54] Y. Yamamoto et al., "Summary of Vertical Tests for S1-Global Project in KEK-STF", Proc. 1st Int. Part. Acc. Conf. (IPAC2010), Kyoto, May 2010.
[55] Y. Yamamoto et al., "Summary of Results and Development of Online Monitor for T-mapping/X-ray-mapping in KEK-STF", Proc. 1st Int. Part. Acc. Conf. (IPAC2010), Kyoto, May 2010.
[56] H. Hayano et al., "Review of SRF Cavities for ILC, XFEL and ERL Applications", Proc. 1st Int. Part. Acc. Conf. (IPAC2010), Kyoto, May 2010.
[57] Y. Morozumi et al, Proc. 1st Intl Part. Acc. Conf. (IPAC2010), Kyoto, May 2010, WEPEC020.
[58] N. Ohuchi et al, "S1-GLOBAL Collaborative effort 8-Cavity-Cryomodule: 2 FNAL, 2 DESY and 4 KEK", Proc. of Intl Linear Acc. Conf. (LINAC10), Tsukuba, September 2010.
[59] E. Kako et al, "Cryomodule Tests of Tesla-like Cavities in S1-Global for ILC", Proc. of Intl Linear Acc. Conf. (LINAC10), Tsukuba, September 2010.
[60] Y. Yamamoto et al, "Recent Results of 1.3 GHz 9-cell Superconducting Cavities in KEK-STF", Proc. of Intl Linear Acc. Conf. (LINAC10), Tsukuba, September 2010.
[61] H. Tongu et al, "Updates on Sc Cavity Inspection", Proc. of Intl Linear Acc. Conf. (LINAC10), Tsukuba, September 2010.
[62] A. Bosotti et al., "S1-GLOBAL MODULE TESTS AT STF/KEK", Proc. 2nd Int. Part. Acc. Conf. (IPAC2011), San Sebastian, Spain, September 2011.
[63] N. Ohuchi et al., "THERMAL PERFORMANCE OF THE S1-GLOBAL CRYOMODULE FOR ILC", Proc. 2nd Int. Part. Acc. Conf. (IPAC2011), San Sebastian, Spain, September 2011.
[64] M. Kuriki et al., "RF PROCESSING OF L-BAND RF GUN FOR KEK-STF", Proc. 2nd Int. Part. Acc. Conf. (IPAC2011), San Sebastian, Spain, September 2011.
[65] P.V. Tyagi et al., "Effect of current densities on sulfur generation at electropolished niobium surface", Proc. 2nd Int. Part. Acc. Conf. (IPAC2011), San Sebastian, Spain, September 2011.
[66] 早野仁司　他、「STF の開発状況」第８回日本加速器学会年会プロシーディング、つくば (2011)
[67] 栗木雅夫　他、「KEK-STF における L-BAND RF 電子銃の RF 試験」第８回日本加速器学会年会プロシーディング、つくば (2011).
[68] 山本康史　他、「KEK-STF における ILC に向けた S1-Global 計画のクライオモジュール試験の結果」第８回日本加速器学会年会プロシーディング、つくば (2011).
[69] 宍戸寿郎　他、「ILC 要求仕様を初めて達成した９セル超伝導空洞」第８回日本加速器学会年会プロシーディング、つくば (2011).
[70] 加古永治　他、「ILC 用 STF 入力結合器の開発」第８回日本加速器学会年会プロシーディング、つくば　(2011).
[71] 頓宮拓　他、「京大における超伝導空胴の品質検査システムの開発」第８回日本加速器学会年会プロシーディング、つくば (2011).

[72] 片桐広明　他、「STF での S1 グローバルのための低電力高周波系の構成」第 8 回日本加速器学会年会プロシーディング、つくば (2011).
[73] 三浦孝子　他、「DRFS における μTCA デジタルフィードバック系」第 8 回日本加速器学会年会プロシーディング、つくば (2011).
[74] 松本利広　他、「KEK 超伝導 RF 試験施設 (STF) における S1 Global 計画での RF 源」第 8 回日本加速器学会年会プロシーディング、つくば (2011).

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。そこでは CW 運転が可能な空洞本体や高周波電力源、その電力を極低温空洞へ伝送する入力結合器などが不可欠であり、それらの基本要素開発を続けている。本年度は製作された加速空洞本体の性能確認試験を行うとともに、その他の周辺部品の製作やクライオスタット内部の配管などの製作を完了させた。

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。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、そこで必要になる超伝導加速空洞を開発している。昨年度までに達成したことは、CW ビームシステムの概念設計、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、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 空洞モジュールの基本設計である。これらの成果の上に本年度は、製作した２台の実機空洞の性能評価試験およびヘリウムジャケットの接合、また部品開発では入力結合器の性能試験準備、試作高調波減衰器の性能確認、さらにはクライオスタット部品の製作などを行った。

２．CW 方式の基幹技術

高電界を用いると短い加速空洞で十分な加速電圧が得られるが、電力や冷却の制限からパルス運転になるため、平均電流値は小さく抑えられる。これに対しＣW運転ではピーク値は小さくても大きい平均電流値が得られるため、発生する放射光の輝度にも飛躍的な向上が期待できる。図１にそのシステム概要を示す。電子銃からの CW ビームを 3MV 程度の入射空洞で加速した上で 22MV の主空洞で加速する。そのビームを放射光光源として利用した後は、再び主空洞に減速位相で入射しビームの運動エネルギーを回収することで、廃棄するビーム電力を一桁小さくすることが出来る。これらを構成する要素として技術の基幹となるものは CW 型の超伝導主加速空洞であり、さらに入射部には 300kW 級の CW 型高周波電力源とその電力を伝える入力結合器および入射部加速空洞である。本課題はこれらの要素技術の開発を行うものである。

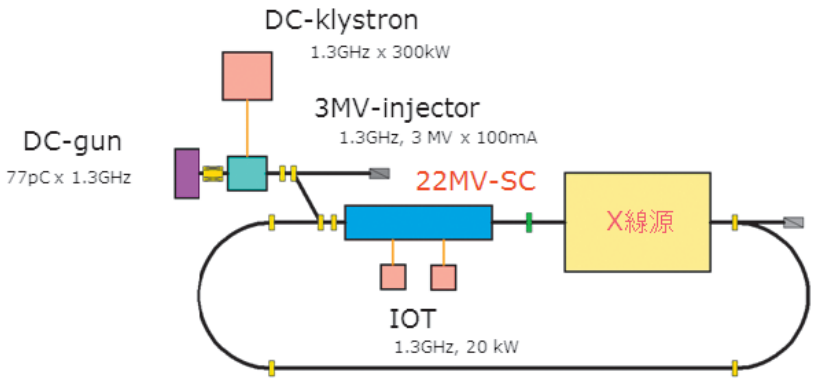


図１　次世代小型高輝度光子ビーム源の CW 稼働概念図

３. 空洞開発

3-1.　９連型主空洞の開発

CW 型空洞として最適化された 1.3GHz ニオブ空洞形状を図２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、試作９連空洞に電解研磨を主体とした表面処理を繰り返すことによって 28MV/m の加速電場を達成することができ、この形状には問題がないことが示された。

図３が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ているがその溶接にはこれまでの試作空洞で得た最適条件が反映されている。

この試作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 125μm 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。その上で９個の各セルの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。図４は調整後の加速器軸上の電場分布を示しており、同じ形をしたセル内の電場分布が９個繰り返していることが判る。この周波数調整後に表面の汚れを除去するべく再度 50μm 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。この工程には試作空洞を通じて得た種々の技術が集約された。

図５は最終的に得られた各空洞の性能を示している。これまでの試験結果から 28MV/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 25MV/m に達したところで計測を停止した。心配された電子放出現象は、20MV/m 以上にわずかに見られる程度であり、Q 値も 1×10^{10} を有しており実用できる性能であることが証明された。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６は空洞内部で発生する放電現象を検知するための回転式診断装置であり、温度センサーと放射

線センサーが取り付けられたアームが冷却中の空洞外側を一周するものである。図７はその実測の一例であり、子午線上に強い放射線が出ていることが判る。これをシミュレーションと比較することで、電子放出が発生する場所を推定する事が出来る。現在は空洞の有効は診断技術として、その計測例を蓄積している段階である。

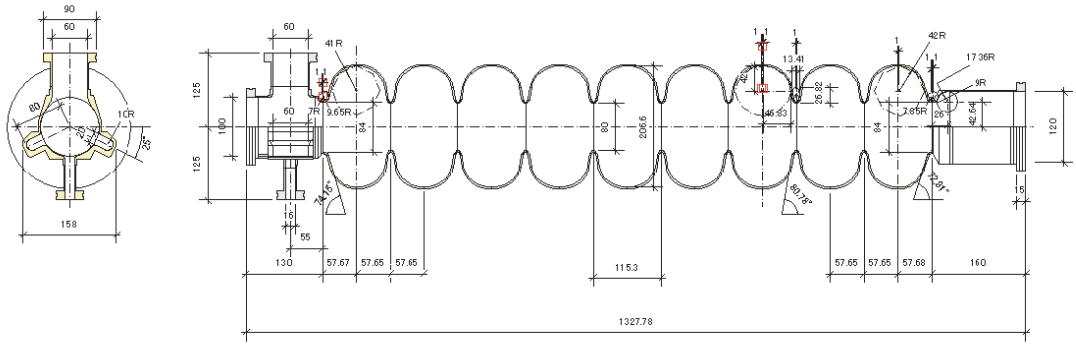


図２　CW 駆動型９セル超伝導加速空洞形状

図３　製作された２台の９連型実機空洞。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。

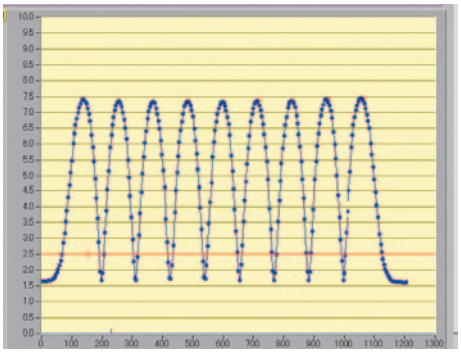


図４　ビーズを用いて計測された９連空洞の軸上加速電場分布。各セルの周波数を 10μｍの精度で調整することで、98% の均一度を達成している。

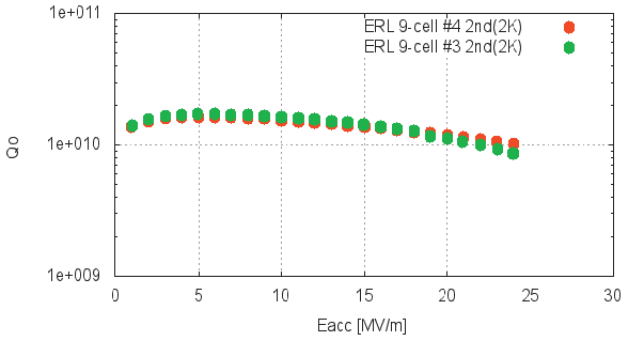


図５　実機９連空洞の性能試験結果。加速電場 25MV/m を確認し必要な電場 15MV/m が確保できた。心配された電子放出 (FE) は軽微で 20MV/m 以上でわずかに見られた。

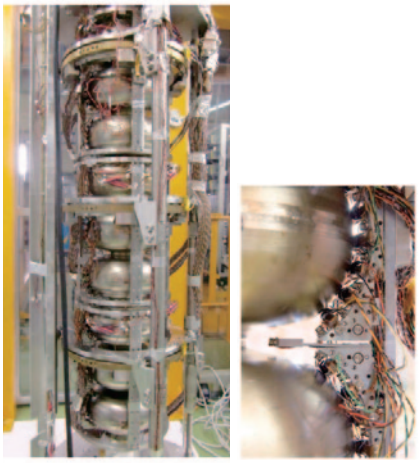


図６　開発中の回転式放射線・温度分布計測装置。温度センサーと放射線計測用 PIN ダイオードが取り付けられたアームが空洞を一周する。

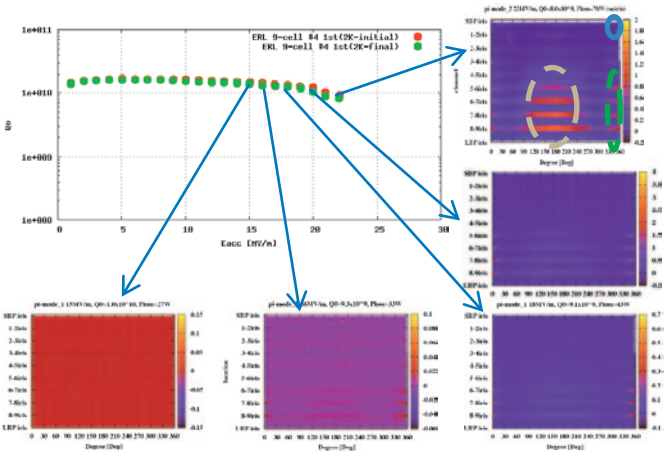


図７　放射線マップの例。電場が高いところで放射線が発生しているのが判る。

3-2. 入射空洞開発

ERL 型加速器の入射部の空洞として、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 3 台で入射部を構成する（図 8)。これによって結合器 1 本当たりの負担を減らすことが出来る。試作したこの形式の空洞についての空洞単体での性能試験では、40MV/m 以上という加速電場を得た。これは設計値の 15MV/m を大きく上回る値である。しかし高調波取り出し結合器を装着した場合には、コネクター部の発熱が原因で 4MV/m 程度にしかならないことが判明した。このため、図 9 に見られるような高調波取り出し部の改造と冷却構造の改善を行った結果、20mV/m の加速電場を確保することが出来た。

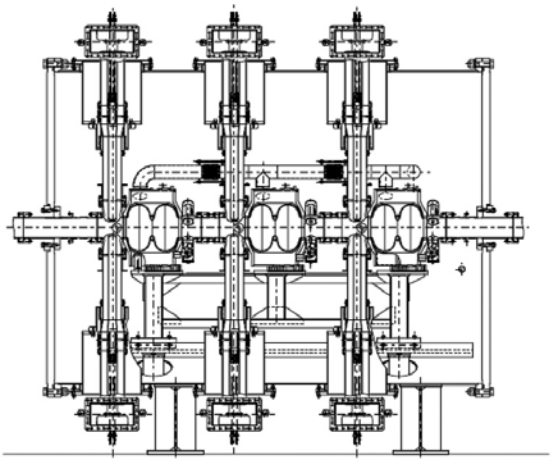


図８　CW 型入射器のための２セル超伝導空洞の構成

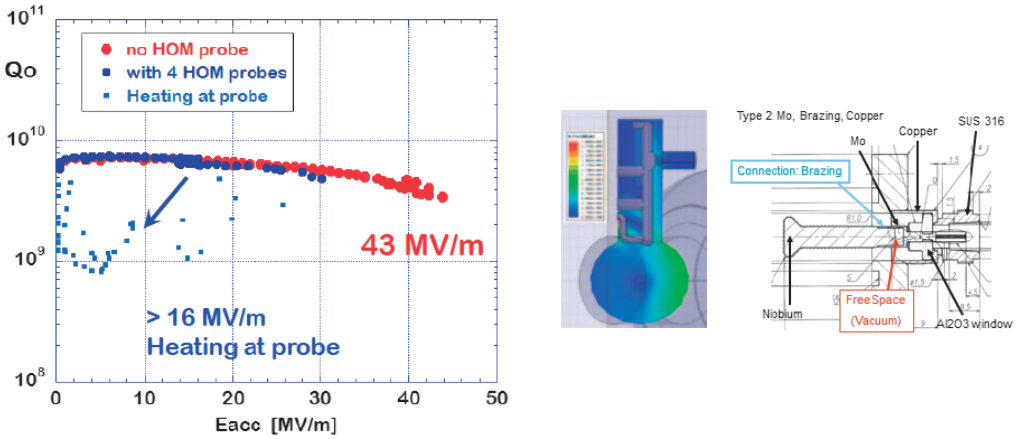


図９　発熱場所は高調波取り出し用コネクターであることが判明。このため、結合器設計を改良するとともに、コネクターの熱伝導度を改善して発熱をおさえることに成功した。この結果、４MV/m の電場上限が 20MV/m に改善した。

４. 周辺部品の開発

4-1.　入力結合器開発

入力結合器の製作技術として、99.7% アルミナセラミック窓のロー付け試験を行った。試作カプラーに熱サイクルを繰り返すとセラミックと金属の接合部で割れを発生することが認められた（図 10）。これまでの室温での使用状況では発生しなかった現象である。このためロー付け部の寸法変更と改造を行った上で熱サイクル試験を実施した。この結果内導体スリーブの厚さを減らすことと、モリブデン支持材の厚みを増すことが有効であることが判明した。これによって製作手順が確立し、実機カプラーの製作が進められた。これらの開発研究は東大物性研の主導で進められた。今年度はこのカプラーの電力試験の準備が行われた（図 11）。

一方入射空洞用入力結合器開発では、6 本のカプラーを製作し、その電力試験を行った。印加電力は 40kW を達成し、安定な動作が確認された。初期の試験ビーム電流には十分な電力伝達能力であり、その後のビーム電流増加につれて徐々にプロセシングを続ける予定である。

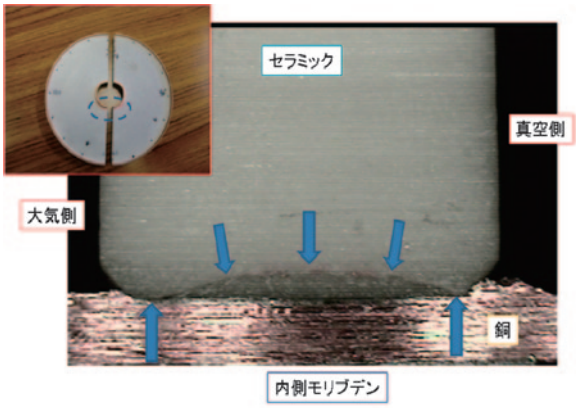


図 10　セラミックのロー付け部で発生したクラック。熱サイクルにより応力の集中が発生した。

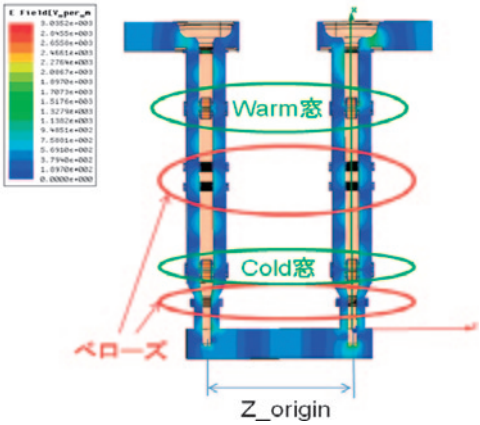


図 11　カプラー電力試験設備の設計。「2 本のカプラーを取り付けて 20kW の電力を透過させる。現在その設備が完成した。

4-2.　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用いる。現在はその製作を進めている。図 12 は直径が 123mm の高調波ダンパーであり、中央部には長さ 80mm、厚さ 3mm のフェライト円筒があり、その両側にクシ歯からの RF シールドが見える。図 13 は空洞に取り付けて計測した減衰特性であり、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所定の減衰（赤）を示していることが判る。

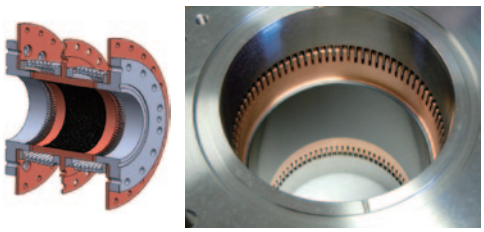


図 12　高調波減衰器内面の接着されたフェライト円筒とその両側にはクシ歯型 RF シールドが見える。

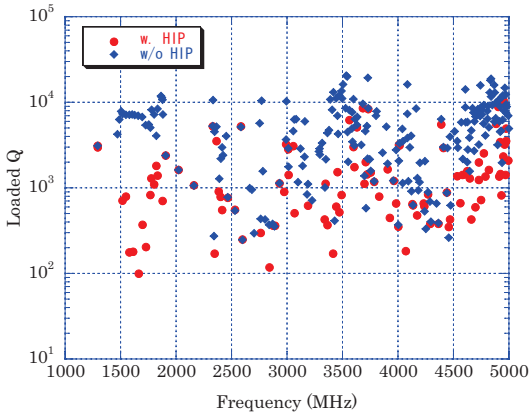


図 13　高調波減衰器の減衰特性。フェライトがないときの Q 値（青）がフェライトを装着することによって減衰した（赤）。

4-3.　周波数チューナー開発

周波数チューナーの試作機についても動作試験が行われ、現設計で十分な動作性能が得られることが判明した。これまでにスライドジャッキを応用した粗調整では 3mm の稼働範囲が確認できており、さらにそのときのヒステリシスが 1 ミクロン程度に抑えられることが判明している。今年度はピエゾ素子を用いた微調機構の性能やチューナー自体の固有振動などの検証試験を進めている。チューナー構造についてはすでに決定し、実機チューナーが製作された。

5. モジュール設計

パルス駆動の超伝導空洞１台当たりの２Ｋへの RF 損失が 1W 程度であるのに比して CW 型空洞は 40W になる。このため冷却能力の増強が必要であり、直径 300mm のヘリウムジャケットに収納された９連空洞２台が上述の各要素とともにチタン枠に固定されるクライオスタット構造を採用している。今年度はその支持部や冷却配管の詳細を検討し、各部品の設計製作を終えた。空洞のアライメントについてはレーザーを使った計測方式を採用することにし、その精度について基本的試験を進めている。また磁気シールドについても地磁気のような弱磁場を低温で十分に遮蔽出来る材料の選択とその設計について調査を続けている。

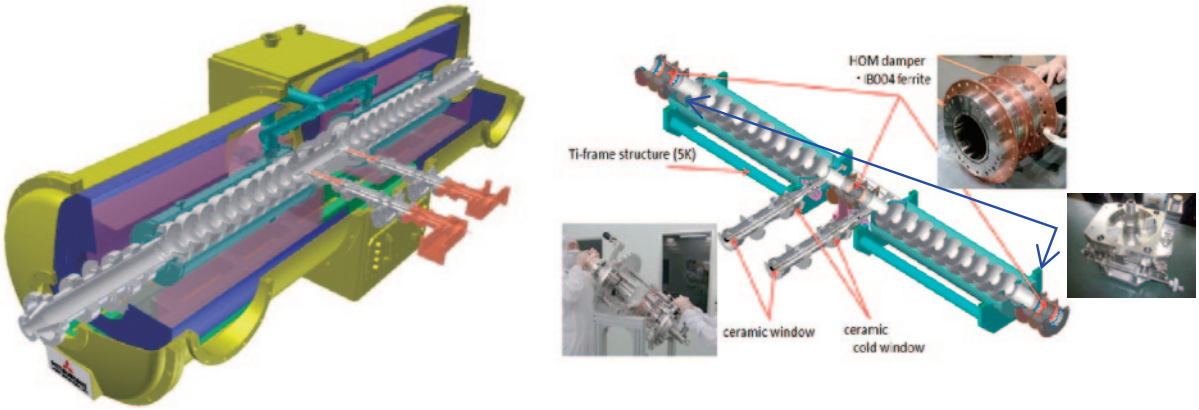


図 13　クライオスタット概要設計。２台の９連空洞が格納される。高調波減衰器が各空洞の間に１台ずつ取り付けられる。入力結合器側が中央部側に来るように組み込まれる。中央部には冷凍機への接続配管も集められる。アライメントとしては、空洞中心が± 0.5mm を目指す。

6. 300kW・CW 大電力マイクロ波源の完成と試験

図 14 は東カウンターホールの配置図である。300kW クライストロンを始めとして 30kW の IOT などの高周波電力源の整備が進み、カプラーや空洞の電力試験に備えている。その隣には 600W ヘリウム冷凍機が整備され、空洞の設置と接続を待っている状態である。さらに放射線対策としてコンクリートシールドの設置が始まっている。

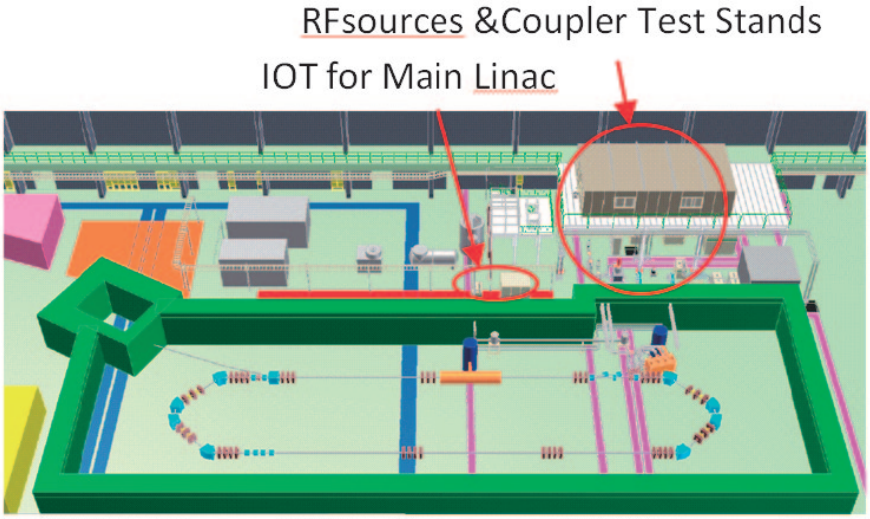


図 14　東カウンターホールで整備が進む CW ビームシステムの試験設備。

7. 次年度へ向けて

上記結果を踏まえて 24 年度では

(1) 結合器や高調波減衰器、周波数チューナーなど各部品の最終性能試験

(2) 総合組立および据付

(3) 冷凍機との接続

(4) 冷却および機能性能試験

を行い、ここまでの研究開発成果を評価する予定である。

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）

参考文献（2011 年度中の発表および掲載論文）

[1] Overview of CW Input Coupler for ERL（口頭、招待講演）
Hiroshi Sakai,
15th International Conference on RF Superconductivity 2011 (SRF2011).

[2] Construction of cERL Cryomodules for Injector and Main Linac（口頭、招待講演）
Kensei Umemori, Takaaki Furuya, Eiji Kako, Shuichi Noguchi, Hiroshi Sakai, Masato Satoh, Toshio Shishido, Ken Watanabe, Yasuchika Yamamoto, Kenji Shinoe, Masaru Sawamura, Enrico Cenni
15th International Conference on RF Superconductivity 2011 (SRF2011).

[3] High Power Tests of KEK-ERL Input Coupler for Main Linac Under LN2 Condition
Hiroshi Sakai, Takaaki Furuya, Norio Nakamura, Kensei Umemori, Kenji Shinoe, Masaru Sawamura, Enrico Cenni
15th International Conference on RF Superconductivity 2011 (SRF2011).

[4] Vertical Test Results on KEK-ERL 9-cell L-band Superconducting cavity（ポスター）
Enrico Cenni, Takaaki Furuya, Hiroshi Sakai, Kensei Umemori, Kenji Shinoe, Masaru Sawamura
15th International Conference on RF Superconductivity 2011 (SRF2011).

[5] COOLING PROPERTIES OF HOM ABSORBER MODEL FOR CERL IN JAPAN
Masaru Sawamura, Takaaki Furuya, Hiroshi Sakai, Kensei Umemori, Kenji Shinoe, Enrico Cenni
15th International Conference on RF Superconductivity 2011 (SRF2011).

[6] ERL 主ライナックのためのカプラー開発 -- 試作カプラー 1 号機におけるハイパワー試験
篠江憲治、阪井寛志、梅森健成、沢村勝、中村典雄、古屋貴章、Enrico Cenni
第 8 回加速器学会年会 .

[7] Progress of SC cavity for KEK-ERL since 2009
Takaaki Furuya, Eiji Kako, Shuichi Noguchi, Masato Sato, Toshiro Shishido, Hiroshi Sakai, Kenji Shinoe, Kensei Umemori, Masaru Sawamura, Enrico Cenni, Ken Watanabe, Y. Yamamoto

[8] Development of main linac cavity for cERL project（口頭）
Kensei Umemori, Takaaki Furuya, Hiroshi Sakai, Masato Sato, Kenji Shinoe, Masaru Sawamura , Enrico Cenni
The 50th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linac (ERL2011)

[9] Development of input coupler for cERL main linac（口頭）
Hiroshi Sakai, Takaaki Furuya, Masato Sato, Kenji Shinoe, Kensei Umemori, Masaru Sawamura, Enrico Cenni
The 50th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linac (ERL2011)

[10] Vertical test diagnostics and simulations study for 9-cell cERL cavities
Enrico Cenni, Takaaki Furuya, Hiroshi Sakai, Masato Sato, Kenji Shinoe, Kensei Umemori, Masaru Sawamura
The 50th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linac (ERL2011)

[11] HOM properties of main linac for cERL in Jalan（口頭）
Masaru Sawamura, Takaaki Furuya, Hiroshi Sakai, Masato Sato, Kenji Shinoe, Kensei Umemori, Enrico Cenni
The 50th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linac (ERL2011)

[12] Performance Evaluation of KEK Tuner
Kazuhiro. Enami, Takaaki. Furuya, Hiroshi Sakai, Masato Sato, Kenji Shinoe, Kensei Umemori, Nobuhiko Sato, Masaru Sawamura, Enrico Cenni

[13] Cryomodule of KEK-ML cavity
Takaaki Furuya, Hiroshi Sakai, Kenji Shinoe, Kensei Umemori, Masaru Sawamura, Enrico Cenni
The 50th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linac (ERL2011)

[14] ERL 主加速部超伝導空洞の開発
梅森健成、阪井寛志、佐藤昌人、沢村勝、篠江憲治、古屋貴章、Enrico Cenni
第 25 回放射光学会年会 .

[15] ERL 主ライナック試作カプラー 1 号機のハイパワー試験（ポスター）
篠江憲治、阪井寛志、梅森健成、沢村勝、中村典雄、古屋貴章、Enrico Cenni
第 25 回放射光学会年会 .

[16] RL 主加速部クライオモジュールの開発（ポスター）
阪井寛志、梅森健成、佐藤昌人、沢村勝、篠江憲治、古屋貴章、Enrico Cenni
第 25 回放射光学会年会 .

[17] ERL Cryomodule Development in Japan -- Progress with SRF cavities for ERL project
Hiroshi Sakai, Takaaki Furuya, Eiji Kako, Shuichi Noguchi, Masato Satoh, Toshio Shishido, Ken Watanabe, Yasuchika Yamamoto, Kensei Umemori, Kenji Shinoe, Masaru Sawamura, Enrico Cenni
ICFA Workshop on Future Light Sources, 2012 (FLS2012).

[18] ERL 用超伝導加速空洞の開発（口頭、招待講演）
阪井寛志 , 江並和宏、古屋貴章 , 加古永治 , 野口修一 , 佐藤昌人 , 篠江憲治 , 宍戸寿郎 , 梅森健成 , 渡辺謙 , 山本康史 , 沢村勝 , Enrico Cenni
日本物理学会　第 67 回年会 .

G. 高周波超伝導空洞用入力カプラーの開発
Development of Input Coupler for CW Superconducting RF Cavity

概　要

昨年度は、カプラー試作機（カプラー１号機）による断熱槽を用いた液体窒素冷却下での大電力テストを行い、最終的に定在波で 25kW までのパワー投入と同じく定在波で 20kW パワーの 16 時間連続投入が可能であることを確かめた。特に内導体ベローズは空冷により、120℃の温度上昇に抑制され、真空の大きな上昇もなく、cold 窓の温度上昇結果は入熱計算とも大きなずれはないことから、RF 設計、熱設計上で一通りの問題点がクリアされたことがわかった。今年度は、1 号機から得られた他の重要な測定結果を CW 超伝導空洞運転用の実機（カプラー 2、3 号機）への設計や製作に反映した。まず、1 つ目として、ろうづけ条件を改善した 1 号機カプラーの cold 窓の液体窒素温度と室温の熱サイクル試験を行い、10 回の熱サイクル試験でもセラミックの割れがないことを確認した。この実験結果からカプラー 1 号機のセラミック窓のろうづけ条件が確立した。2 つ目は実機 9 セル空洞を用いて、空洞と 1 号機カプラーの結合度測定を行い、計算と実測との比較を行った。実測は 1.3 倍ほど計算より小さかった。最終的に、1 号機の結果と、世界各国の microphonics の抑制技術の向上を踏まえた結合度 $Q_L=1\times10^7 \sim 4\times10^7$ の設計指針から、2、3 号機は内導体のアンテナ長を 1 号機から 7 mm短い条件とした。これらの設計変更の後、実機用の cold 窓 2 台を製作し、さらにはカプラー 2、3 号機用の大電力テストスタンドの製作を行った。テストスタンドの製作後に組立を行い、実際に RF 設計や真空上の問題がないことを確認した。

１．はじめに

本研究は 1.3GHzCW 型超伝導空洞用入力カプラーの開発である。最大加速勾配 20MV/m 運転時に、最大入力パワー 20kW の投入が入力カプラーの基本仕様である。一昨年度まではセラミック窓の単体テストを通じ、セラミック窓の RF 設計の問題点を洗い出し、昨年度にカプラー試作機（カプラー１号機）の設計・製作を行った。特にカプラーテスト用に製作した断熱槽で cold 窓を覆い、液体窒素タンクに汲んだ液体窒素からブレード線にて cold 窓を 80K に近くに冷やすことで、モジュール組み込みに近い条件下にて、カプラー１号機の大電力テストを行った（図 1、左図）。10kW にて multipacting level が存在したが、pulse processing を行い、定在波で最大 25kW のパワーを入れることができた（図 1、右図）。また、プロセス後、20kW で 16 時間パワーを保持することができた。内導体ベローズは窒素ガスでの空冷により、120 度の温度上昇に抑えられ、真空は warm 側は最高で 4×10^{-6} Pa まで上がった後、下がっていく傾向が見られ、安定な運転が可能であることが分かった。他のベローズの温度上昇も問題ないレベルであり、カプラー１号機の RF 設計と熱設計は大電力テストでも問題ないことが実験的に分かった。また、プロセスの効果は昇温後、大気解放後も保持していることを確認した。

今年度はろうづけ条件の改良を行ったカプラー１号機の cold 窓を用いて、前年度問題となった熱サイクルによるセラミック窓の割れが回避できるかを確かめた。また、9 セル空洞との結合度測定などから、cold 窓の設計の詳細、特に可変機構の詳細を詰め、主空洞モジュール組み込み用の実機 2 台の cold 窓の製作を行った。以下詳細を示す。

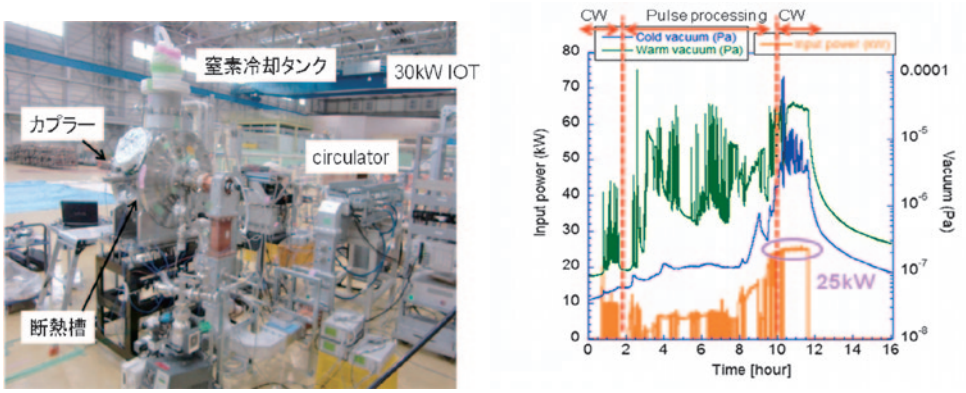


図１　左：カプラー１号機の大電力テストセットアップ。右：25kW までの大電力テスト結果。（橙：投入パワー、青：cold 窓側真空、緑：warm 窓側真空）。途中 pulse processing を行う。

2. カプラー１号機 cold 窓の液体窒素温度と室温間の熱サイクル試験

カプラーは 2K 温度の空洞への入熱を減らすべく cold 窓は液体窒素温度である 80K の温度定点に接続される。そこから cold 部の内導体等での発熱を吸収する必要がある。このような冷却過程を繰り返すことでセラミックが割れる可能性が考えられていたため、昨年度に液体窒素温度と室温の冷却を繰り返した場合にセラミック窓が熱的な応力によりに破壊されないか確認するための熱サイクル試験を行った。その結果、5 回の熱サイクルにて、真空リークを引き起こすことが確認された（表 1：旧 cold 窓参照）。特にセラミック窓の内導体付近のセラミック断面を詳細に見たところ、アーチ状の割れが確認された（図 2）。異種材料同士の局所的な応力集中による割れがろうづけの際、問題とされており、この問題の解決のために熱応力解析によるろうづけの条件出しを行った。具体的には、内導体銅スリーブの減厚（1mm→ 0.8mm）、Mo サポートの増厚（旧 cold 窓の 2 倍）を行うことで、端部の応力集中が 7 － 8 割程度に削減できることがわかった。この設計方針を前年度作成したカプラー 1 号機の cold 窓のろうづけ条件とし、製作を行った（詳細は前年度報告書参照）。

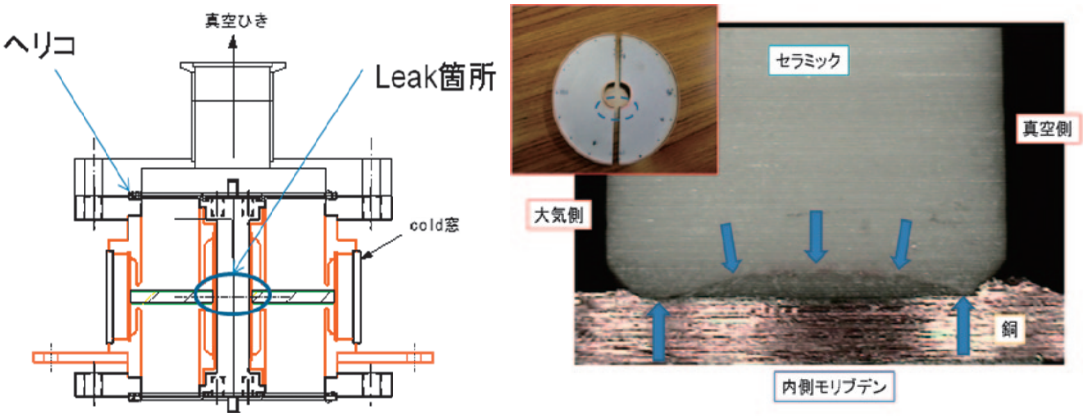


図２　旧 cold 窓のセラミックの割れた箇所（左：旧 cold 窓、右：詳細断面図）

今年度はこの改善したろうづけ条件の 1 号機 cold 窓を用いた熱サイクル試験を行い、セラミックの耐久度が改善されたかを確かめた。図 3 に熱サイクルの測定用セットアップを示す。前年度、大電力テストにて我々は cold 窓の窒素冷却を行いテストを行ったため、同じテストスタンドにて熱サイクル

試験を行った。冷却は大電力テスト同様、液体窒素タンクに液体窒素を投入し、そこからの伝熱にて、cold 窓を冷却する。図 4 がその温度履歴である。1 回目、2 回目は大電力投入時の冷却及び昇温として数え、その後の 3 回目から 10 回目までの cold 窓の温度履歴を示している。約 7 時間程度で液体窒素温度まではいかないが −166℃まで下げ、その後は液体窒素がなくなった後に半日かけて昇温を行った。昇温後は cold 側（図 3 水色部）から He を投入し、warm 側（図 3 緑部）にリークディテクタを用意し、セラミック窓の割れが無いかリークチェックを行った。10 回の熱サイクルを通じ、リーク量は 1×10^{-10} Pa m^3/s 以下であり、リークは検知されなかった（表 1：カプラー 1 号機 cold 窓参照）。この結果からセラミック窓のろうづけ条件が確立した。前年度にて熱サイクルで割れた窓の改良設計を行い、本 cold 窓が 10 回の熱サイクル試験には耐えたことは、改良の効果が実験的に検証されたことであり、非常に大きな成果であると言えよう。

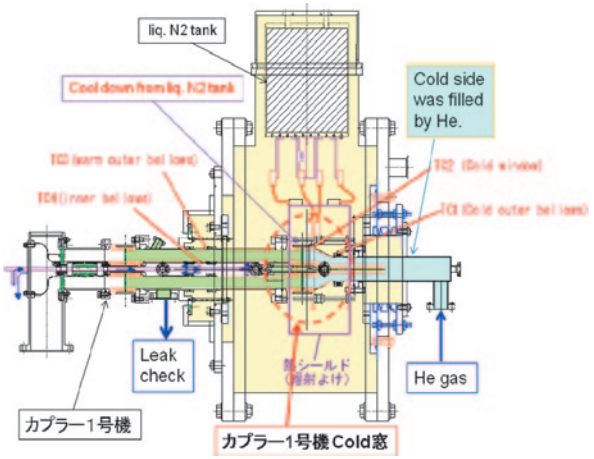


図 3　熱サイクルテストのセットアップ。cold 側（水色部）から He を投入し、warm 側（緑部）にリークディテクタをつなげて、リークチェックを行った。

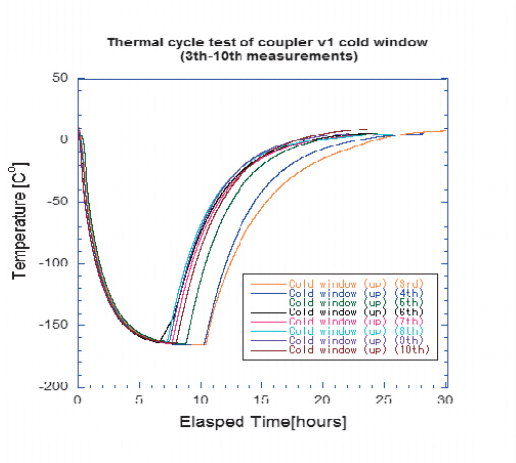


図 4　カプラー 1 号機 cold 窓の熱サイクルテスト時の cold 窓の温度データ。3 回目から 10 回目までの温度履歴。

表 1 ：ろうづけ条件の違うセラミック窓の熱サイクル後でのリーク量。

冷却回数	旧 cold 窓	カプラー 1 号機 cold 窓
1 回目	$< 1 \times 10^{-10}$ Pa m^3/s	$< 1 \times 10^{-10}$ Pa m^3/s
2 回目	$< 1 \times 10^{-10}$ Pa m^3/s	$< 1 \times 10^{-10}$ Pa m^3/s
3 回目	$< 1 \times 10^{-10}$ Pa m^3/s	$< 1 \times 10^{-10}$ Pa m^3/s
4 回目	$< 1 \times 10^{-10}$ Pa m^3/s	$< 1 \times 10^{-10}$ Pa m^3/s
5 回目	$> 1 \times 10^{-4}$ Pa m^3/s（リーク）	$< 1 \times 10^{-10}$ Pa m^3/s
6 回目	--	$< 1 \times 10^{-10}$ Pa m^3/s
7 回目	--	$< 1 \times 10^{-10}$ Pa m^3/s
8 回目	--	$< 1 \times 10^{-10}$ Pa m^3/s
9 回目	--	$< 1 \times 10^{-10}$ Pa m^3/s
10 回目	--	$< 1 \times 10^{-10}$ Pa m^3/s (no leak)

3. CW 型９セル空洞を用いたカプラー１号機の結合度測定

次にカプラー１号機を用いて空洞との結合度の測定を行った。図５がそのセットアップである。CW 空洞は今までに測定を行ってきた CW 型の９セル超伝導空洞を用いてそのカプラーポートに１号機カプラーを取り付け、カプラー側（図５ port1）からパワーを投入し、空洞の出口にもう一つのポート（図５ port2）を設け、network analyzer によるパワーの透過と反射から、結合度（Qext）測定を行った。特に運転に近い状態を再現すべく、カプラー１号機にドアノブの付いた状態での測定と、cold 窓だけをつけた状態の２種類の測定を行った。なお、我々のカプラー設計では cold 窓部に結合度可変のベローズを設けており、その距離を変化させて、結合度の変化が設計の値と合うかどうかの比較を行った。特にドアノブ装着時にはカプラーをクライオモジュールに取り付けたことを想定し、ドアノブに装着した駆動部（図５参照）から cold 窓のベローズを動かし、結合度が変化するかを確かめた。

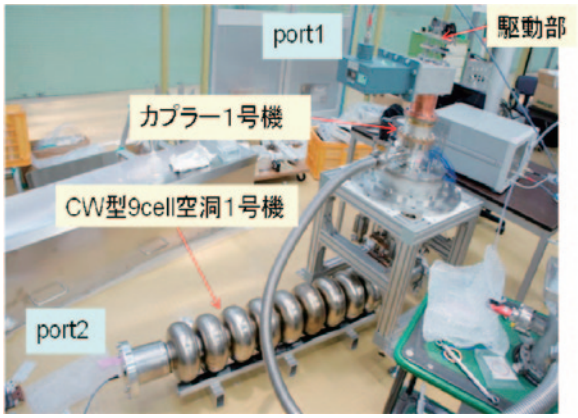


図５　カプラー１号機を用いた９セル空洞との結合度測定のセットアップ。

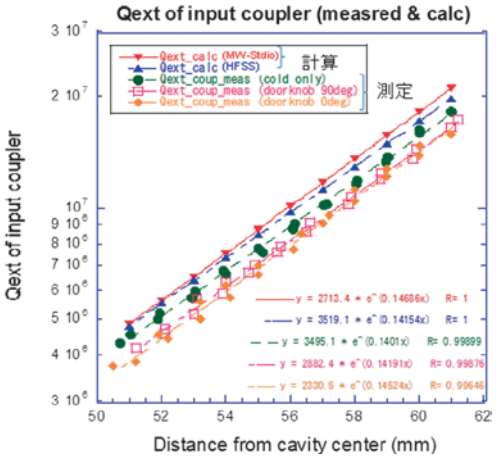


図６　カプラー１号機と CW9 セル空洞の実測と計算結果。横軸は空洞中心からカプラー内導体先端までの距離、縦軸はカプラーの空洞への結合度 (Qext)。

図６が結合度測定の結果である。図６の横軸は空洞中心から cold 窓の内導体先端までの距離を示しており、空洞からの距離 56mm（中心値）をベローズの自然長に設定している。そこから、駆動部を通じ、± 5mm 動かした時の結合度の変化を示したものが図６である。図６のピンクと橙色の四角のグラフが図５のようにドアノブを付けた時に中心値から± 5mm 動かした際の空洞との結合度の変化を示している。また図６の緑のグラフが warm 窓を外し、cold 窓のみを９セル空洞につけて、測定した際の結合度の変化を示している。ピンクと橙色のグラフの違いはドアノブの角度を空洞の向きに対し、同じ方向にした場合（０度）と直角にした場合（90 度）の結合度の測定値を示している。また、図６の赤三角と青三角はシミュレーションによる結合度の計算結果である。赤、青はそれぞれシミュレーションコード（赤：MW-studio、青：HFSS）の違いを示す。計算と実測ではカプラーのアンテナ位置の変化に伴う結合度の変化の傾きがほぼ同じであることがわかる。それに対し、実測（ドアノブつき）と計算結果では Qext にして 1.3 倍の違い、空洞からの距離のずれに換算すると約 2mm 近い違いがあることがわかる。計算がアンテナのみでドアノブを含んでいないため、大きなずれが生じていると考えて、cold 窓だけの測定結果と計算とを図６から比較すると、cold 窓単体と計算ではやや違いがあるものの、0.7mm 程度のずれに収まる。カプラー１号機の実測値で特にドアノブの影響も検討し、設計値からま

ずは 2mm 小さくすることを条件とした。

最後に今までの設計では、microphonics の抑制がどの程度効くのかわからないため、より安全を見越して、空洞の microphonics による周波数変化（Δf = 50Hz）の際の設計値 $Q_L = 2 \times 10^7$ をカプラー結合度の可変範囲の最大値で検討していた。すなわち、$Q_L = 5 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$ を設計値としていたが、近年の各国の超伝導空洞開発の進歩や周波数変化の抑制技術の向上を見越し、さらに 5mm アンテナ長を短くした設計にした。すなわち、可変範囲の中心値を $Q_L = 2 \times 10^7$ に設定し、可変範囲を $Q_L = 1 \times 10^7 \sim 4 \times 10^7$ とし、より高い Q_L よる運転を行えるかを試験する方向で設計を行うことにした。高い Q_L による運転が可能となれば運転時の投入 RF パワーの削減へとつながり、将来的な CW 型超伝導空洞の運転コストの削減、入熱の削減などへとつながることになる。

したがって、実験結果と設計の見直しにより、実機（2、3 号機）に対しては 1 号機から 2mm+5mm=7mm 減少させたアンテナ長を採用することにした。

4. 実機カプラー 2、3 号機の大電力テストスタンドの設計、製作

クライオモジュールテストのために、前年度に 2 号機用の warm 窓と外導体を各 1 台ずつ製作し、今年度は 1 号機から得られた知見を生かして 2、3 号機用の 2 台の cold 窓を製作した。特に、クライオモジュールに組み入れる前に大電力によるカプラーの processing を行って 2 次電子放出を抑制すること、また、その後にクリーンな環境にて組立てを行うことから、2 台のカプラーを同時に大電力テストが行えるようにテストスタンドの設計を行った。

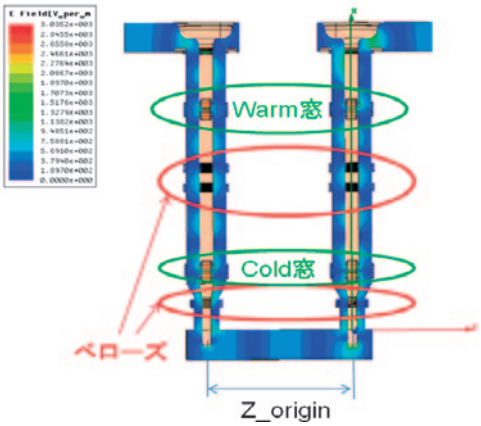


図７　カプラーテストスタンド概念図。カプラーを２つ組み合わせた形である。

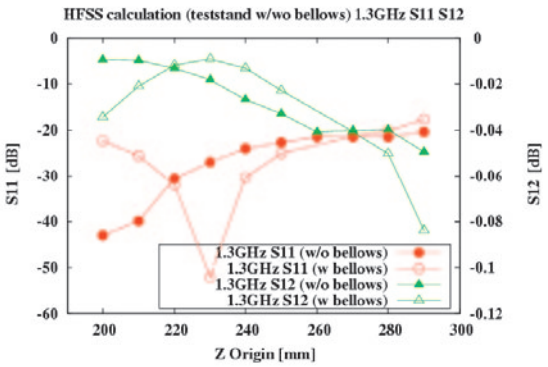


図８　カプラーのベローズ有り／無しでのテストスタンドのシミュレーション結果。

図 7 がそのテストスタンドの概念図である。cold 部を真空で長期に保管可能にするために、実機カプラー 2 台を導波管結合器により組み合わせ、さらにカプラー内面全体を processing するために進行波による大電力テストを行うことを前提としたものである。図 8 がカプラー間の距離（図 7 の Z_origin）を変化させたときの RF の透過率（S12）と反射率（S11）のシミュレーションによる計算結果を示したものである。カプラー間の距離を調整することで透過が良くなっている様子が分かる。特に図 7 に示す部分のベローズがある場合（図 8：red open circle(S11)、green open triangle(S12)）とない場合（図 8：red solid circle(S11)、green solid triangle）の比較を行ったところ、反射が最小値になる場所が Z_origin の間隔にて 30mm もの違いがあった。このベローズありのシミュレーション結果を反映し、このカプラー間の距離（Z_origin）を 230mm としてカプラーテストスタンドの設計を行った。

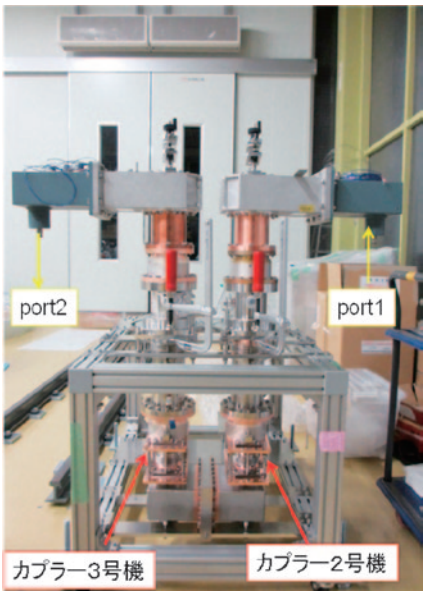


図９　製作したカプラー２，３号機とカプラーテストスタンド。

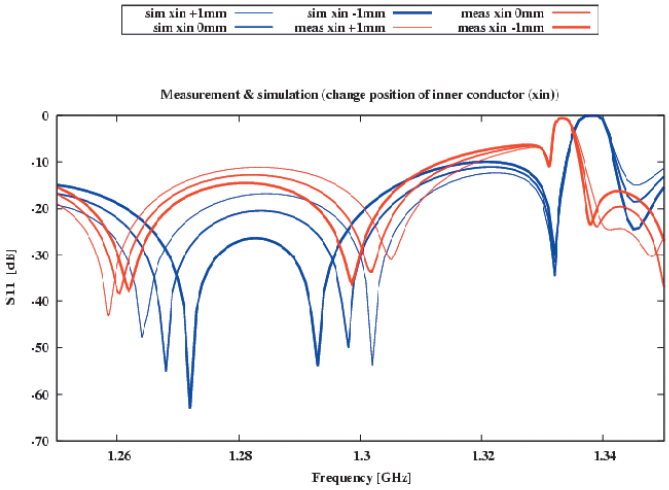


図 10　cold 部内導体の挿入長を変えた時の S11 の測定値（赤線）と計算値（青線）。横軸は周波数、縦軸は反射 (S11) (dB) を示す。

図 9 が設計に合わせて製作したカプラー 2，3 号機の cold 窓と 2 号機の warm 窓及び外導体を組み合わせたカプラーテストスタンドである。3 号機部の warm 窓と外導体は 1 号機の warm 窓と外導体で代用した。特に RF 設計が計算通りであるかどうかを測定するために上部ドアノブ部をつけ、片方の導波管（port1）からもう片方の導波管（port2）までの透過と反射の測定を行った。図 10 の赤線がその測定結果である。我々のカプラーは cold 窓のベローズが付いており、内導体の挿入長（図 10 の xin）を変えることでカプラー管の結合度も調整可能であるので、その変化を測定したものも図 10 には示してある。xin ＝ 0mm が元来の距離であるが、その測定結果で S11 が −28dB、S12 が −0.12dB となり、設計目標である S11 <−25dB に調整されてカプラースタンドが製作されているのがわかった。計算結果を図 10 の青線で示している。挿入長 1mm の場合のシミュレーション結果（図 10 青線 xin：+1mm）と挿入長 0mm の場合の実測（図 10 赤線 xin：0mm）がほぼ同じ値を示しており、設計と製作では挿入長換算にて 1mm 以内で合致することが分かった。すなわち、ベローズ込みで行った計算結果が実測とほぼ良く合っている。

このカプラースタンドはローレベル測定の後にクリーンルーム内での組立及真空リークチェックまでを問題なく終了しており、次年度始めには大電力テストを予定している。

5. 実機カプラーのクライオモジュール設計への反映

今年度では本機カプラーの設計がほぼ終了したため、具体的にクライオモジュールとカプラーの取り合いを反映したクライオモジュールの設計を行った。

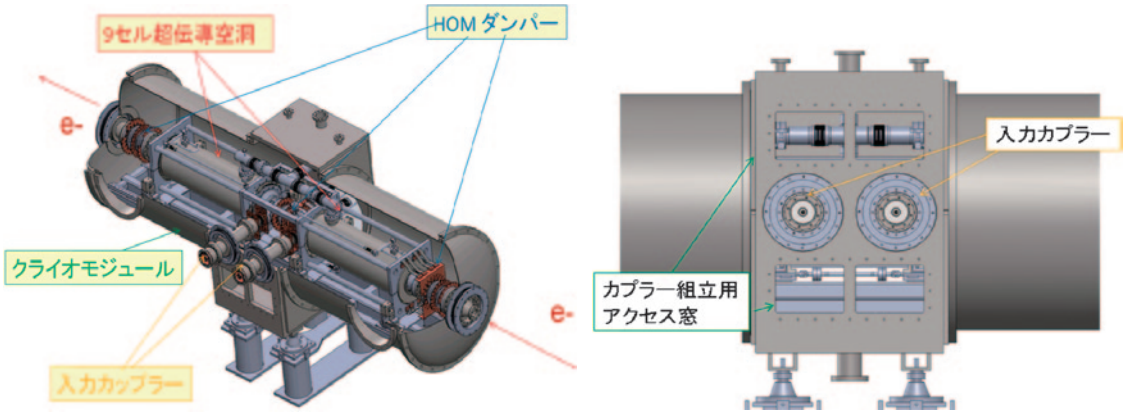


図 11　左：CW 型クライオモジュール設計図。右：クライオモジュールをカプラー側から見た図。

図 11 がその設計結果である。2 台のカプラーはクライオモジュールの中央（タワー部）に横からつながる設計である。cold 窓まではクリーンルーム内にて空洞と一体で組立、その後、空洞がクライオモジュールに取り付けられた後にモジュールの中央部から残りの warm 窓を組み込む。図 11 がクライオモジュール中央部の詳細図である。カプラーの取り付けを行うためにタワー部上下にカプラー組立用のアクセス窓を設け、そこからカプラーの warm 窓を接続するための治具を設置する。また接続のためのネジ締めなどをこのアクセス窓から行う。組み立て後は、warm 窓はクライオモジュールに固定され、治具を取り外して、最後にアクセス窓を閉じてカプラー設置が完成となる。

6．まとめ

今年度はまず、ろうづけ条件の改良を行ったカプラー 1 号機の cold 窓を用いて、熱サイクル試験を行った。改良前は 5 回の熱サイクルでセラミック窓が割れたのに対し、改良後は 10 回の熱サイクル試験でも割れないことが確認された。CW 超伝導空洞を用いた運転時では年に多くて 2 回の冷却、昇温しか行わないものとすると、少なくとも 5 年以上はこのカプラーを用いて運転が可能であることがわかる。また 1 号機カプラーと CW 型 9 セル超伝導空洞を用いた結合度測定を行った。測定した結合度はドアノブ上部に接続された駆動部から変更可能であり、測定値と設計値の挿入長に対する変化の傾きは良い一致を示した。但し、ドアノブまで含めた結合度の絶対値は設計値の 1.3 倍低い値であった。したがって、1 号機の設計値との違いの効果と、microphonics の抑制効果を反映した可変範囲 $Q_L=1\times10^7\sim4\times10^7$ への設計変更を踏まえ、実機カプラー 2，3 号機の cold 窓の内導体のアンテナ長を 1 号機から 7 mm短い条件とした。これらの設計変更の後、今年度は 2，3 号機 cold 窓を用いた大電力テストスタンドの設計、製作を行った。実際に製作後にテストスタンドの組立を行い、RF 設計や真空上の問題がないことを確認した。また、実機カプラーの設計・製作を踏まえ、特にカプラーの組立手順や治具の設計をクライオモジュールの設計に反映させた。

次年度はカプラー 2 台のテストスタンドを用いた大電力テストを行う。また、クライオモジュールへ組み込み、モジュールの冷却後に 3 号機用 warm 窓と外導体を用いていよいよ CW 超伝導空洞モジュールでのカプラーの大電力テストを行うことになる。

開発スタッフ

責任者：中村典雄（東京大学物性研究所）

担当者：高木宏之、篠江憲治、渋谷孝、工藤博文、伊藤功（東京大学物性研究所）、阪井寛志（高エネルギー加速器研究機構）

参考文献（2011 年度中の発表および掲載論文）

[1] K. Suganuma, et. al., Ann. Rev. Mater. Sci 1988.18:47-73

[2] H. Sakai, “Overview of CW input couplers for ERL”, Proceedings of 15th SRF workshop, Chicago, 2011, FRIOA05.

[3] K. Umemori et al, “Construction of cERL cryomodules for injector and main linac”, Proceedings of 15th SRF workshop, Chicago, 2011, FRIOA06.

[4] H. Sakai et al., “High power tests of KEK-ERL input coupler for main linac under liquid nitrogen condition”, Proceedings of 15th SRF workshop, Chicago, 2011, TUPO005.

[5] 篠江憲治 他、「ERL 主ライナックのためのカプラーの開発 -- 試作カプラー 1 号機におけるハイパワー試験 --」、第 8 回加速器学会プロシーディングス、つくば、茨城 (2011), TUPS139。

[6] H.Sakai et al., “Development of input coupler for compact ERL main linac”, Proceedings of ERL2011, Tsukuba, Japan, 2011, WG3006.

[7] T.Furuya et al., “Cryomodule of KEK main linac cavity”, Proceedings of ERL2011, Tsukuba, Japan, 2011.

[8] 阪井寛志 他、「ERL 主加速部クライオモジュールの開発」、第 25 回放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム、鳥栖、佐賀 (2012).

[9] 篠江憲治 他、「ERL 主ライナック試作カプラー 1 号機のハイパワー試験」、第 25 回放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム、鳥栖、佐賀 (2012).

H. 小型 1.3GHz 高周波源開発
Development of Compact Distributed RF Source

概　要

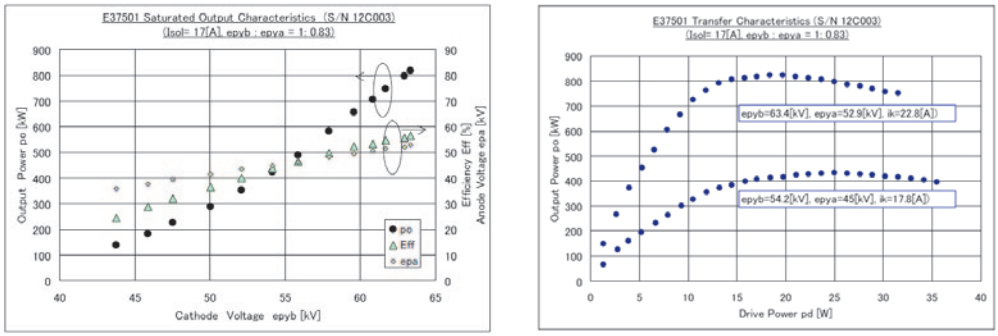
将来の小型高フラックスX線源用要素技術開発のために、超低エミッタンスビームの加速に必要なパルス運転型の超伝導加速空洞の研究開発を進めている。この計画における小型1.3GHz高周波源の開発が昨年に引き続き行われた。開発のもとになる基本概念は昨年に引き続き、小さい電力の高周波源を分布させながら効率の良いシステムを開発するというものを基本とした。すなわち電源（これは直流電源とパルスモジュレータを含む）は共通として、高周波源であるクライストロンを空洞1台または2台に1台ずつ配して、結果として小型化分布型高周波システムを構築しようとするもので超伝導加速器では特に有効である。基本的な構成要素はモジュレーションアノード電極付きクライストロン、そのモジュレーションアノードと呼ばれる3極管構造のグリッドのような電極へパルス変調をかける、モジューレーションアノードパルス電源、電力を供給する直流高圧電源であるが、電源関係と2台のクライストロンの試験は平成22年度に実施した。発生した電力を空洞まで分配するシステムは1本のクライストロンから2空洞へ大電力高周波を供給するものであるが、高性能の電力分配器を介し、各空洞からの反射が別の空洞へ行って干渉することが無ければ非常にシンプルで小型化された電力分配系が実現される。これは理論上可能であるが、実際にはそれを現実の運転により実証する必要があり、平成22年度に行い、成功裏に評価試験を終了した。平成23年度は以上の成果を踏まえて、さらに小型化分布型高周波システムを拡充すべく、小型分布型システム用クライストロンを2台発注しその製造を行い、納入された。これに関しては平成24年度に試験を行う予定であるが、工場試験は良好であるので、現実の試験で性能の確認をするのは容易である。平成23年度では、更に小型化故障率の低下を狙って、このクライストロンのビーム収束に永久磁石収束を採用するプロジェクトを行った。実機の半分の大きさのフェライトで作った永久磁石を製造し、磁場分布等から初期の性能が得られたことが確認された。これらに関してこの成果報告書において報告する。このシステムは小型高フラックスX線源用加速器のみならず、従来大きい高周波源を用いて設計されてきた国際リニアコライダーの高周波源への応用も可能であり、具体的な応用に関して注目され始めた。

1．モジュレーションアノード付きクライストロンの性能

表1にモジュレーションアノード付きクライストロンの仕様を示した。平成23年度に発注した2台の小型化分布型高周波システム用クライストロンのうちの1本に関する工場での受け入れ試験の結果を図1に示した。印加直流電圧64kVの時に出力が800kW以上で効率が58%であり、表1の仕様値をほぼ満足する結果を得た。

表1　モジュレーションアノード付きクライストロンの仕様、及び電源の仕様

Klystron		
	Frequency	1.3 GHz
	Peak Power	750 kW
	Average Power Output	7.50 kW
	RF pulse width	2 ms
	Repitition Rate	5 Hz
	Efficiency	60 %
	Saturated Gain	
	Cathode voltage	62.7 kV
	Cathode current	18.8 A
	Perveance(Beam@62.5kV)	1.2 μPerv
	(Gun@53kV)	1.53 μPerv
	Life Time	110,000 hours
	# in 3 cryomodule	6.5
	Focusing	Permanent magnet focusing
	Type of Klystron	Modulated Anode Type
DC Power supply per 6 cryomodules		
	# of klystron (6 cryomodule)	13
	Max Voltage	71.5 kV
	Peak Pulse Current	244 A
	Average Current	2.47 A
	Output Power	177 kW
	Pulse width	2.2 ms
	Repitition Rate	5 Hz
	Voltage Sag	<1 %
Bouncer Circuit		
	Capacitor	26 μF
	Capacitance	260 μF
	Inductance	4.9 mH
M. Anode Modulator		
	Anode Voltage	53 kV
	Anode Bias Voltage	−2 kV



（1）　　（2）

図１　左図（1）印加電圧対出力電力特性、右図（2）入力電力対出力電力特性

2. 小型化分布型高周波システム用クライストロンの永久磁石収束の開発

小型化した分布型高周波源は小回りが利くためにその応用性は高いが、さらに省電力、故障率低減化による信頼性の向上などから、クライストロンのビームを永久磁石で収束させることを目論みた。一般にアルニコやサマリコバルト系の永久磁石は高価で対費用効果を考えると得策ではないが、本研究では周波数がＬバンドということもあり、磁場が低くて済むのでフェライトを用いた安価な磁石を開発した。フルスケールの製作はリスクがあるので 1/2 サイズのモデルを製作した。

図２にはクライストロンのビームに沿った軸上の磁場分布の目標値と設計した際の計算値を示した。クライストロンの性能上は電子のエネルギーの低い電子銃近傍の部分（Cathode position）が重要であるのでこの部分を十分に近い分布にするのが良い。

この設計に基づいて小さいフェライトを組み立て半分のモデルを構築した。クライストロンを取り付ける際の制約や微調可変が可能なように、可変機構を導入してある。機械設計の３次元化した模式図を図３に示した。この半分のモデルに関して磁場測定を行った結果、目標に近い軸上分布を得ることができた。今後はフルサイズの磁石を製作し、実際にクライストロンに装着して高周波電力が電磁石収束に比べて同等であることを確かめるステップに進みたい。

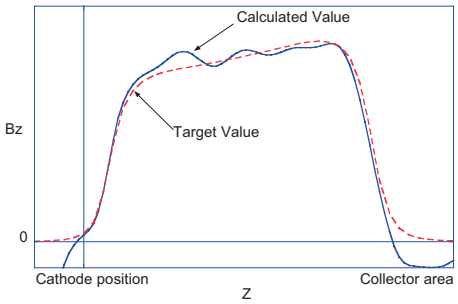


図２　設計磁場

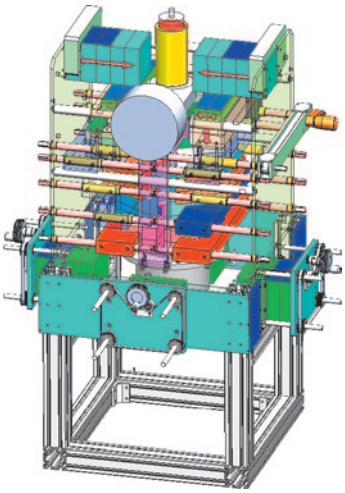


図３　機械設計を３次元化したもの

開発スタッフ

責任者：福田茂樹（高エネルギー加速器研究機構）

担当者：道園真一郎、明本光生、中島啓光、吉田光宏、松下英樹（以上 高エネルギー加速器研究機構）
松本氏

参考文献（2011 年度中の発表および掲載論文）

[1] S. Michizono, D.A. Arakawa, S. Fukuda, E. Kako, H. Katagiri, T. Matsumoto, T. Miura, Y. Yano, Performance of LLRF System at S1-Global in KEK, IPAC2011.

[2] T. Miura, D.A. Arakawa, S. Fukuda, E. Kako, H. Katagiri, T. Matsumoto, S. Michizono, Y. Yano, Performance of the Micro-TCA Digital Feedback Board for DRFS Test at KEK-STF, IPAC2011.

[3] Y. Iwashita [Kyoto ICR, Uji, Kyoto, Japan] S. Fukuda, T. Matsumoto, S. Michizono, M. Yoshida, Development of Permanent Magnet Focusing for Klystrons, IPAC2011.

[4] T. Matsumoto, M. Akemoto, D.A. Arakawa, S. Fukuda, H. Honma, E. Kako, H. Katagiri, S. Matsumoto, H. Matsushita, S. Michizono, T. Miura, H. Nakajima, K. Nakao, T. Shidara, T. Takenaka, Y. Yano, M. Yoshida, Operation Test of Distributed RF System with Circulator-less Waveguide Distribution in S1-Global Project at STF/KEK, IPAC2011.

[5] Yoshiharu Yano, Mitsuhiro Yoshida, Hiroaki Katagiri, Takako Miura, Shinichiro Michizono, Shigeki Fukuda, Development of Compact Klystron Drive System and RF Monitor, 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.

[6] Takako Miura, Dai Arakawa, Hiroaki Katagiri, Toshihiro Matsumoto, Shinichiro Michizono, Yoshiharu Yano, Shigeki Fukuda, Digital Feedback System using uTCA for DRFS, 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.

[7] Yoshihisa Iwashita, Shigeki Fukuda, Permanent Magnet Focusing for Klystron, 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.

I. 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 線の測定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。2011 年度は、SOI シリコンピクセル検出器のさらなる性能向上を行うべくアップグレードを行った。また、最終年度に完成する量子ビーム加速器 X 線発生装置実機を用いた X 線撮影実験の準備を進めた。

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（INTPIX5）の動作・評価試験を行った。このセンサーは、INTPIX4 で明らかになったバグを修正し、かつ性能向上をめざしたアップグレード版である。INTPIX4 と INTPIX5 の仕様を表 1 に示す。ピクセルサイズが 12 μm に縮小され、面積が増えたことにより画素数、有効面積が増加した。INTPIX5 もこれまでと同様、専用のサブボード（図 1）に実装される。汎用の読み出しボードと組み合わせてデータ収集システムを構築した。この検出器にはゲインスイッチが搭載されており、使用する X 線エネルギーに応じて高ゲイン、低ゲインを選択できる。ゲインスイッチの効果を確認した結果を図 2 に示す。リガクの X 線発生装置（ターゲット Mo）からの X 線を用いて校正を行った。Mo ターゲットを用いた場合、特性 X 線（Kα-17.5keV）

表 1 INTPIX4 と INTPIX5 の仕様比較

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

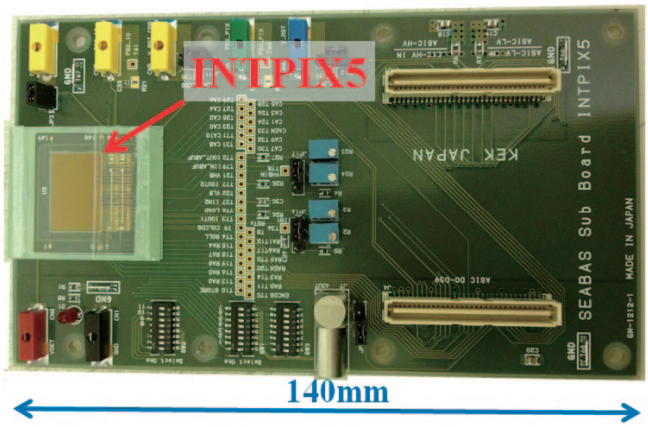


図 1　INTPIX5・サブボード写真

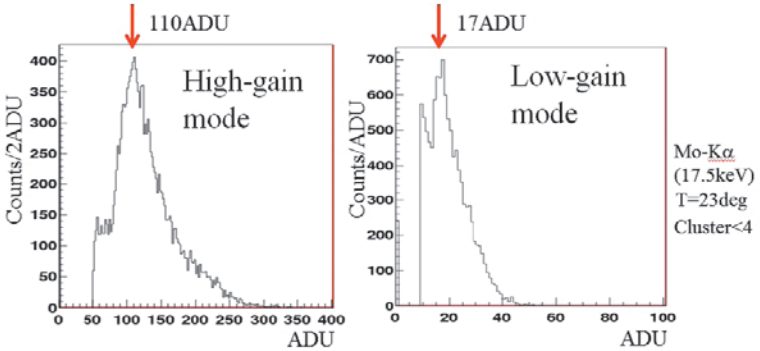


図 2　high gain mode（左）および low gain mode（右）で取得した Mo-K 線 X 線スペクトル

によるピークが観測できる。ピーク位置は、高ゲイン設定で出力値 110ADU であったのに対し、低ゲイン設定では 17ADU であった。ゲイン調整用容量は 60fF、ピクセル容量は 10fF であるので、ゲイン比の設計値は 7 であり、試験結果と矛盾しない。高い X 線エネルギーを検出する場合、高ゲイン設定で使用するとダイナミックレンジを大きく取れない。従って、低ゲイン設定で使用することになる。量子ビーム加速器から発生する準単色 X 線のエネルギーはビームコンディション調整により変えられるので、発生条件に応じてゲイン設定を切り替えて検出器を使用する。この機能は、加速器実機の性能検証を行う上で非常に有効である。INTPIX5 で撮影した 25 lp/mm テストチャート X 線像を図 3 に示す。このテストチャートは厚さ 20μm の金製で、20μm のライン & スペースが 5 セット並んでいる。ピクセルサイズが 12 μm になったことで、Contrast Transfer Function CTF）は約 64 % となり、5 セットのパターンが鮮明に観測できた。撮影には標準焦点（1mm）の X 線発生装置を用いているので、衝突点サイズが最小 10 μm の量子ビーム加速器・X 線発生装置と INTPIX5 との組み合わせで高精細 X 線イメージングを実現する目途がついたと言える。

2. 量子ビーム実験用検出器システム開発

最終年度の量子ビーム加速器 X 線発生実験の準備を進めた。実験の初期段階には検出器エリアへのバックグラウンド放射線量を把握し対策を練る必要があるため、NaI(Tl) シンチレーション検出器（88/DM、2 インチ直径、2 インチ厚さ、アルミケース、光学窓付）を導入し、調整試験を行った。加速器で生成される電子の最大エネルギーは 40MeV であるので、発生するバックグラウンド γ 線エネルギーとしても 40 MeV までエネルギーをカバーするような電圧設定を決定した。校正には Co-60 からの γ 線（1.17, 1.33 MeV）を用いた。NaI からの信号は ADC に送られるが、フルスケールが 12bit (4096) であるので、印可電圧が約 −1440V の時に 40MeV までの γ 線をカバーできる。この検出器を量子ビーム加速器・検出器エリアに設置し、バックグラウンド測定および抑制に取り組む予定である。また、今回は複数の検出器をあらかじめ準備しておき、様々な測定方法で SOI 検出器と従来使用されている検出器の比較を行い、SOI 検出器の仕様検討を行う必要があるので、X 線検出器として広く使われている X 線 CCD カメラ（Photonic Science XFDI 2.22 : 1, 25mm）を導入した。準単色 X 線に対する感度を評価するために、放射光を用いた。0.766 Å（16.187keV）単色 X 線を用いて X 線像が得られることを確認し（図 4）、20 lp/mm スリットについて CTF 10 − 20 % を確認した。これにより、量子ビーム加速器・X 線発生装置で使用する準備が整った。

最終年度はいよいよ量子ビーム加速器運転が開始されるため、検出器エリアに上述のバックグラウンド測定用 NaI シンチレーション検出器、SOI イメージセンサー、X 線 CCD を常駐させて、評価・応用試験を行う予定である。

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、高井英明（以上　高エネルギー加速器研究機構）

参考文献（2011 年度中の発表および掲載論文）

［1］ “Development of SOI pixel process technology”, Y. Arai, et al., Nucl. Instr. And Meth. A636, Issue 1, Supplement, 21 April 2011, Pages S31–S36

[2] “Performance study of SOI monolithic pixel detectors for X-ray application”, T. Miyoshi et al., Nucl. Instr. And Meth. A636, Issue 1, Supplement, 21 April 2011, Pages S237–S241

[3] “Recent progress of the pixel detectors R&D based on the SOI technology”, T. Miyoshi et al., The Technology and Instrumentation in Particle Physics 2011 (TIPP 2011), 8-14 June 2011

[4] “High Resolution X-ray Imaging Sensor with SOI CMOS Technology”, A. Takeda, Y. Arai et al., The Technology and Instrumentation in Particle Physics 2011 (TIPP 2011), 8-14 June 2011

[5] 2011年8月29日－9月2日 応用物理学会, 31a-T-15, SOI技術を用いた放射線イメージセンサーのX線応用, 三好敏喜, 新井康夫

[6] 2011年9月15－18日, 日本物理学会, 18aSE-2, 積分型SOI検出器のX線イメージングセンサとしての性能評価 武田彩希, 新井康夫, 他SOIPIXグループ

[7] 2011年9月15－18日, 日本物理学会, 17aSE-3, SOIピクセル検出器用チップ読み出しボードSEABAS2の開発II, 田内一弥, 新井康夫, 他SOIPIXグループ

[8] 2011年9月20－23日, 日本物理学会, 23aJA-13, SOI技術を用いた放射線ピクセルセンサーのX線応用, 三好敏喜, 他SOIPIXグループ

[9] “Test Results of X-Ray Imaging Sensor with SOI CMOS Technology”, A. Takeda, Y. Arai et al., The 2011 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference, and 18th International Workshop on Room-Temperature Semiconductor X-ray and Gamma-ray Detectors, the Conference Center, Valencia, Spain, 23-29 October 2011

[10] “Performance study of monolithic pixel detectors fabricated with FD-SOI technology”, T. Miyoshi et al., Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2011 IEEE, 23-29 October 2011, On Pages 1702 – 1707, Conference Publications

[11] “SOI Pixel Technology”, Y. Arai, 8th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors, Taipei, Taiwan, 5-8 December 2011

[12] “P-in-n and n-in-p sensor performance study of SOI monolithic pixel detectors”, T. Miyoshi, 8th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors, Taipei, Taiwan, 5-8 December 2011

[13] 2012年3月24-27日, 日本物理学会, 27aFB-5, SOI技術を用いた積分型ピクセルセンサーの基本特性評価, 三好敏喜, 他SOIPIXグループ

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

概　要

超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発のために、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を用いた実機での計測を前に小型加速器における検出試験を行った。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。また、線形加速器とレーザー共振器によるレーザーコンプトン散乱 X 線による X 線像を世界で初めて撮像し、その評価も行った。次年度以降、超伝導加速器における X 線の検出・評価及びアップグレードした小型加速器における X 線像の撮影を行っていく予定である。

1.　はじめに

今年度は KEK 小型加速器（LUCX）における X 線検出器の評価及びレーザーコンプトン散乱 X 線の観測及び X 線像の撮像、レーザーコンプトン散乱 X 線の評価を行った。X 線検出器の設置のみならず解析や画像の蓄積を行うためのシステムを構築するとともに、実際に使用する加速器を用いた検出器の評価も行った。まずはこれまでのレーザーコンプトン散乱試験同様に強度読み出し式の MCP（Micro-Channel Plate）を用いた X 線の観測を行い S/N や X 線強度を評価し、その後 2 次元画像読み出し式の検出器を用いた撮像を行った。X 線イメージの撮像は 2 種類の X 線エネルギーにて行い、高エネルギーの 28keV の X 線及びエネルギーを下げた 15keVX 線での撮像に成功している。これらの結果から、実際に撮像に必要な X 線量を実測するとともにこの値を目標値とした小型加速器改造計画を策定中である。次年度にはこの結果を反映した小型加速器のアップグレードがなされるとともに超伝導加速器によって生成した X 線に関しても計測を行う予定である。

2.　X 線検出器評価試験

実際に検出を試みることになる小型加速器においてこれまでに構築した 2 次元読み出し式検出器の評価試験を行った。以前の報告にも記載してあるが、実地にて構築した検出器に関して簡単に説明する。以下の図 1 にセットアップの写真を、図 2 にセットアップの概念図を示す。X 線検出器も加速器ビームライン同様に高真空を要求するが、ビームラインとは接続せず独立の真空容器を用いてセットアップした。生成した X 線はベリリウム窓を通ってビームラインから大気中に取り出され、再度チタン窓（15keVX 線の場合にはベリリウム窓を使用）を通って検出器に入射される。X 線は MCP にて電子に変換され、その電子は最大約 10^7 倍増幅される。増幅された電子は蛍光面に衝突することによってその強度分布に応じた蛍光を発する。蛍光は大気中に取り出され、ミラーを用いてビームラインから分けられる。これによってビームハロー等起因の高エネルギーバックグラウンドと切り分けることができる。蛍光はレンズ結像系を通りイメージインテンシファイヤによって時間的にもバックグラウンドと切り分けられるとともに、増幅（約 10^4 倍）され CCD カメライメージが検出される。このように非常に大きい増幅率を持っているために少ない光量でも X 線イメージが取得できるとともに時間的にも空間的

にもエネルギー的にもバックグラウンドと切り分けていることでできる限りの S/N を達成している。

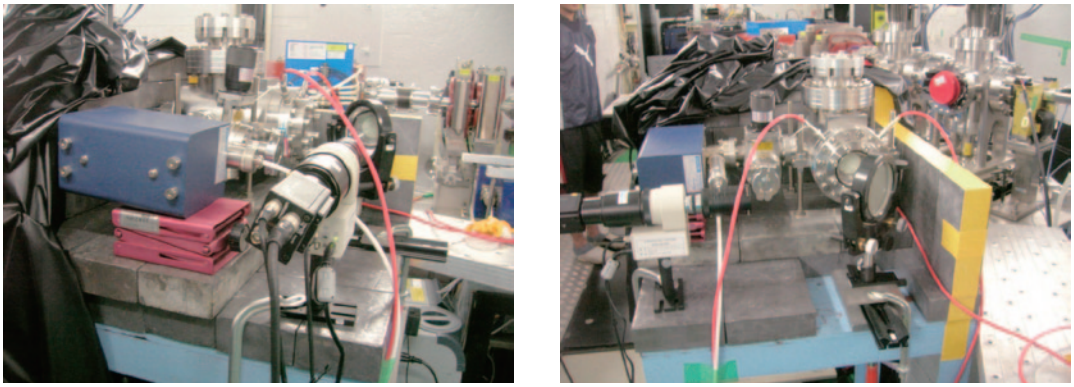


図 1：画像読み出し X 線検出器のセットアップ写真

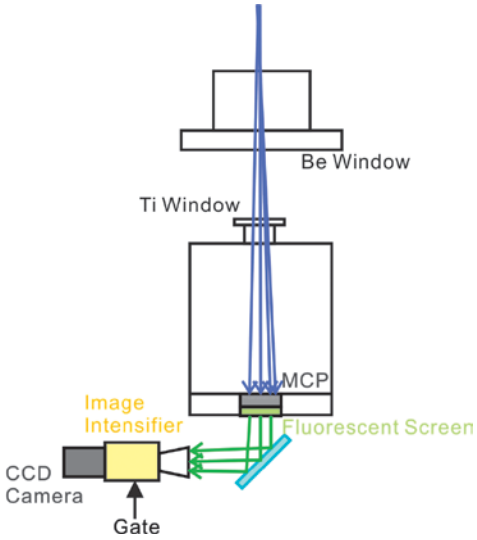


図 2：画像読み出し X 線検出器の概念図

このシステムを LUCX 加速器システムに組み込み、光量不足を補うための画像積算やバックグラウンドを差し引くためのソフトシステムを構築した。このようなシステムによって試験的に制動放射 X 線を用いて取得した X 線像を以下の図 3、図 4 に示す。レーザーとの衝突点には衝突位置を調整するためのスクリーンが設置されている。スクリーンの厚さは 100μm であり、かつ衝突時にレーザーと集光点を合わせるために電子ビームも収束することが可能である。そこでこのスクリーンによって生成した制動放射 X 線（エネルギー～ 40MeV）を用いて検出器及びその処理ソフトウェアの試験を行った。図 3 は一般に用いられているライターの X 線透視像を、図 4 は M6 及び M4 のネジの像を示した。図 3 を見てわかるようにライター内の細かな構造も切り分けて検出できており、初期の検出のためのイメージング装置としては十分な性能が確認できる。また、試験的に X 線の線源サイズを変化させて取得したネジの像を図 4 に示す。線源サイズをスクリーン上で 100 ～ 200μm 程度とした場合にはネジのピッチが綺麗に見えているのに比べ、線源サイズを 1.5mm 程度とした場合には特に M4 のネジのピッチがボケてしまっていることがわかる。これにより線源サイズが小さい方が分解能の高い X 線イメージが取得できることがわかる。レーザーコンプトン散乱 X 線ではレーザーサイズ（30μm）程度の線源サイズが得られる予定であり、より解像度の高い画像が期待される。

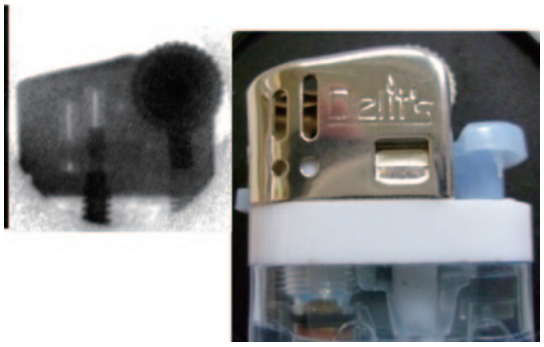
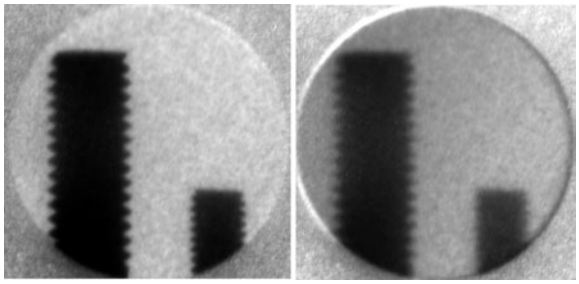


図３：制動放射Ｘ線によって取得したライターの透視像



（A）187μm × 126μm　（B）1.5mm × 1.3mm

図４：制動放射Ｘ線を用い、線源サイズを変えた場合のネジのＸ線像

3.　小型加速器（LUCX）におけるＸ線検出試験

3-1.　Ｘ線生成及び強度評価

小型加速器（LUCX）におけるレーザーコンプトン散乱Ｘ線検出試験を行った。電子ビーム側のビームラインの改造やシケインの導入による効果によってバックグラウンドが削減できたことは昨年度までに報告した。これに加え、レーザー共振器のフィネス（増大率）を向上させることによって今年度は最大 400μJ/pulse の Burst 蓄積に成功した。これを用いたＸ線生成試験を試みた。電子ビーム・レーザー光のパラメータを以下の表１に示す。

表１：レーザーコンプトン散乱Ｘ線生成試験時の電子ビーム・レーザーパラメータ

Electron Beam			Laser		
Energy	Charge	N Bunch	Wavelength	Pulse Energy	
30/40MeV	400pC	100bunch/train	1064nm	400μJ/pulse	
Beam size (H)	Beam size (V)	Bunch length	Waist size	Pulse duration	Col. Angle
200μm (1σ)	53μm (1σ)	4.3ps (rms)	30μm (1σ)	3ps (rms)	20deg

先ほども述べたとおり、電子ビームよりもレーザー光の方が小さい（30μm（1σ））ためこのサイズがＸ線の線源サイズとなる。

これまで同様にまずは強度読み出し式の MCP を用いてＸ線生成の確認及び強度計測を行った。図５にその波形を示す。緑がダークカレント起因のバックグラウンド・赤がビーム起因のバックグラウンド・青がバックグラウンド＋Ｘ線を示している。

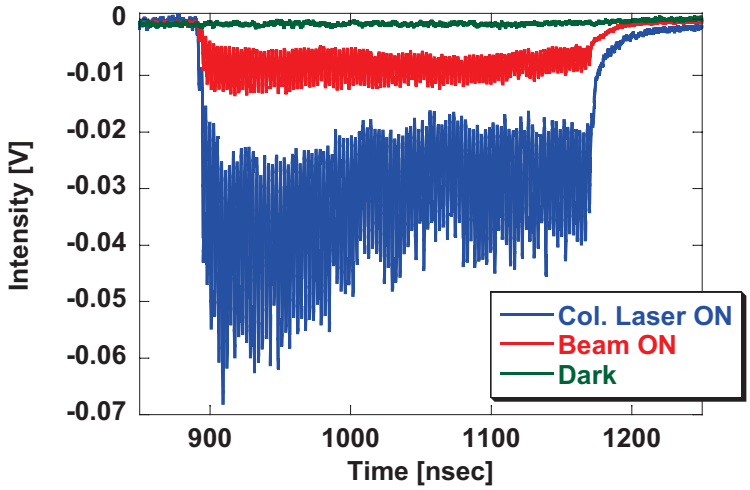


図５：強度読み出し MCP によるレーザーコンプトン散乱 X 線の検出結果

前年度も報告した通り、シケインの導入によってダークカレント起因のバックグラウンドはほとんど削減できている。また、レーザー光強度の改善によって S/N も改善されるとともに X 線強度も 2.1 × 10^5Photon/sec と増強されている。X 線の強度は MCP の検出効率である 5% と増幅率から算出した。これまでもシンチレーション検出器と合わせた計測を行っており、10% の誤差で一致しているため、信頼できる値である。

3-2.　X 線イメージング試験（X 線エネルギー：30keV ／ 15keV）

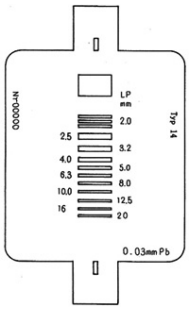
２章で述べた画像読み出し式の検出器を用いてレーザーコンプトン散乱 X 線によるイメージングを行った。X 線強度が 2.1 × 10^5Photon/sec とまだ十分でないため画像を蓄積することによって統計を稼ぎイメージングを試みた。まず用意したイメージング検出器システムの評価を行い、その後２種類の X 線エネルギーにてイメージングを行った。より高エネルギーの 30keV（電子ビームエネルギー 40MeV）と軟組織イメージング用にエネルギーを下げた 15keV（電子ビームエネルギー 30MeV）にて試験を行った。

画像読み出し検出器システムの評価

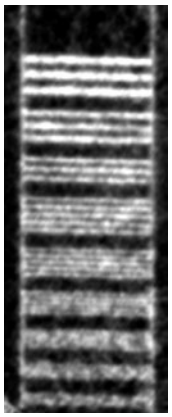
画像読み出し検出器システムの評価として、分解能を評価するためにテストチャート（森山 X 線用品製）を用いた X 線イメージングを行った。その結果を以下の図６に示す。(A) はテストチャートの外観図を、(B) は取得した X 線イメージを、(C) は X 線イメージのラインプロファイルを示している。テストチャートは様々な厚さのライン・スペースが刻んである鉛板であり、これを用いることでどの程度のライン・スペースを分離することが可能であるかを試験することができる。ライン・スペースのピッチは上から 250μm・200μm・156μm・125μm・100μm・・・となっており、100μm ピッチを分離するには至っていないが、125μm 程度であれば、分離可能であるように見える。今回の検出器システムは弱い光でも見ることができるように増幅率を上げており、また検出器に入っている統計量も少ないことから統計揺らぎもまだ多いが、想定程度の分解能が得られたと考えている。

28keV X 線イメージング

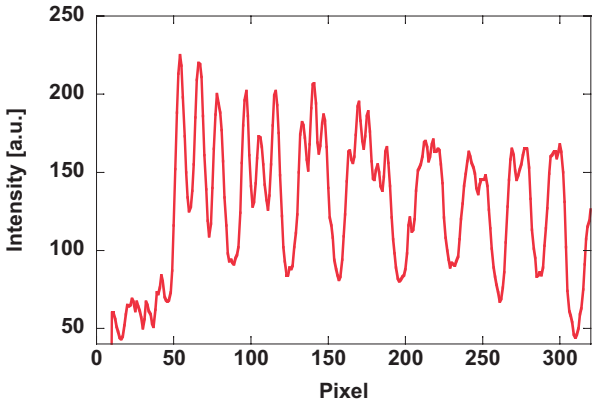
電子ビームのエネルギーを 40MeV とし、1μm のレーザー光とコンプトン散乱させることによって約 28keV のエネルギーの X 線が生成できる。これを用いて X 線イメージングを試みた。その結果を図7・図 8 に示す。28keV の比較的高エネルギーの X 線では軽い元素で構成される生体などでは良いコントラストが得られにくく、かつ生成している X 線数が少ないため、きれいなイメージを取得することができなかった。そこで金属から構成されている IC や可変抵抗など電子回路に用いられる部品のイメージを取得した。図 7 は IC の X 線像を示しており、配線用の足から真ん中に配置されたシリコンチップに内部で配線されている様子がわかる。非常に細かい内部の配線であるが、十分に分離して観測されていることが確認できる。図 8 は可変抵抗の内部を撮影したもので、配線用のラインはもちろん、右のピンにある抵抗を変更するためのネジの構造や薄くて少しわかりにくいが、ネジによって回転するギアも確認できることがわかる。まだ分解能・解像度両面で不十分ではあるが、初めてのデモンストレーションとしては十分であると考えている。



(A) テストチャート



(B) テストチャートイメージ



(C) テストチャートラインプロファイル

図 6：X 線イメージングシステム評価試験結果

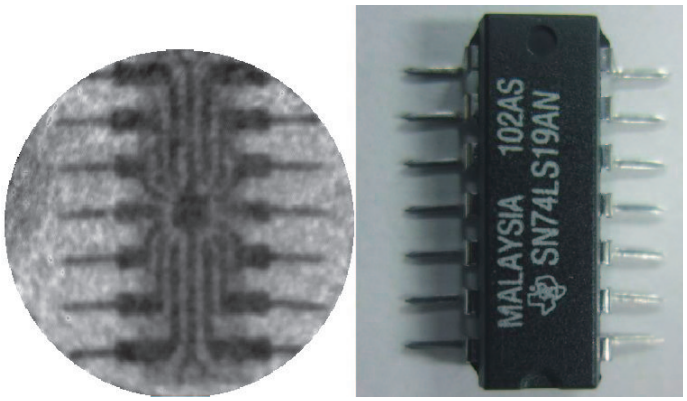


図 7：IC の X 線画像（左）と写真（右）

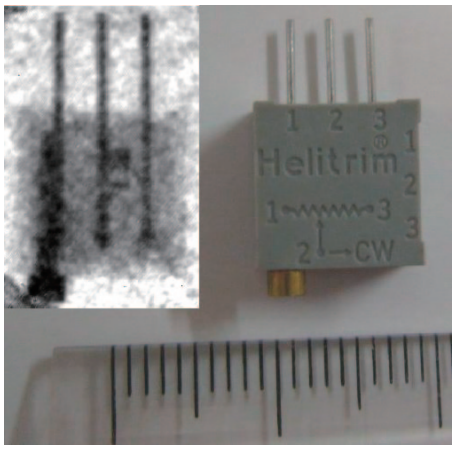


図８：可変抵抗のＸ線像（左）と写真（右）

15keV Ｘ線イメージング

電子ビームのエネルギーを 30MeV としコンプトン散乱を行うと 15keV 程度の比較的エネルギーの下がった X 線が得られる。これを用いることで生体や植物などのイメージングが可能であった。その結果を以下の図 9・図 10 に示す。

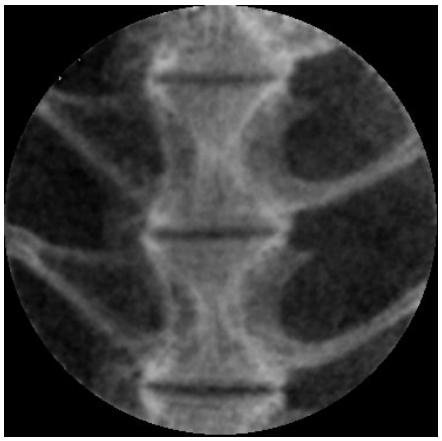


図９：ホッケの背骨のＸ線像

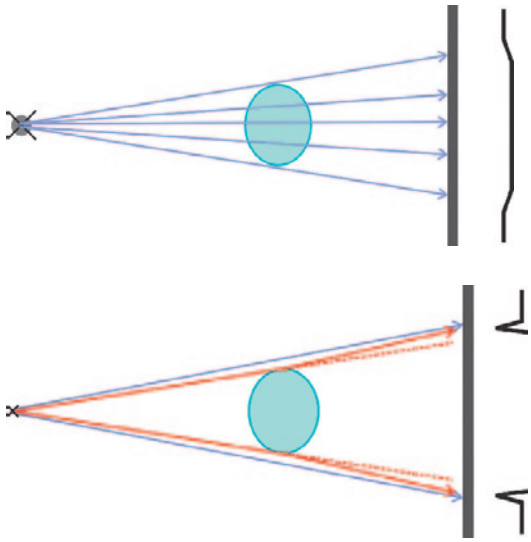
図 10：落花生の透視Ｘ線像

図 9 はホッケの背骨部の X 線像を示している。非常に細かな構造から、背骨の両脇にある軟骨部の構造まで非常に良く撮像されていることがわかる。次節ではこのサンプルを用いた屈折コントラスト試験に関して報告する。図 10 には落花生の透視像を示す。非常に軽い皮の部分や内部にある種による吸収と内部の隙間も確認することができる。

これらの画像取得には約 30 分の画像積算を要している。これは生成 X 線数が少ないためであるが、逆に 30 分間全く線源位置がずれることなく X 線を生成できており、非常に安定な X 線源であると言える。これはレーザーとして光共振器を用いているため、共振器ミラーで構成された境界条件を満たす光のみがコンプトン散乱しているためである。このことからも X 線の強度増強が今後の課題となるが、現時点でも非常に品質の良く、安定な X 線源であることがわかる。

3-3. 屈折コントラスト試験

前節のホッケの背骨を用いて屈折コントラストイメージングの観測を試みた。屈折コントラストと吸収コントラストの概念図を以下に示す。



（A）吸収コントラスト　　（B）屈折コントラスト

図 11：吸収コントラストと屈折コントラストの概念図

通常の X 線写真などで用いられているのは図 11（A）に示した吸収コントラストである。サンプルによって X 線が吸収（減衰）されることによって、サンプルを通過した X 線は強度が弱くなり、その他は強いといったイメージが取得できる。図 11（B）は屈折コントラストを示している。X 線の線源サイズが非常に小さい高品質な X 線源の場合には屈折コントラストを観測することができる。生体などの軽元素では X 線の吸収は非常に小さく、コントラストがつきにくい。すると（B）に示したようなサンプルによる屈折の効果の方が大きく、なりコントラストが付きやすくなる。特に図に示しているようにサンプルのエッジ部では屈折によって曲げられた X 線と直線上に飛来した X 線が重なりエッジを強調するようなプロファイルが得られる。今回生成した X 線の線源サイズは 30μm と非常に小さいため、屈折コントラストが得られることが期待されるため、試験を行った。

サンプルから検出器までの距離を 370mm と 670mm の 2 種類に関して X 線像を取得し、比較した。

X 線の屈折角は小さいため、ある程度距離を開けないとエッジ部の強調が起こらないためである。2 種類の距離で取得したイメージを以下の図 12 に、それぞれのラインプロファイルを図 13 に示す。図 12 の左右を比較してもわかるように明らかに右図の方がコントラストがついて見えることがわかる。さらにこれを可視化しているのが図 13 である。図 13 ではラインプロファイルを示しているが、特に矢印をつけた位置に屈折コントラスト特有のエッジを強調しているプロファイルが確認できる。まだ統計揺らぎも大きい状態のイメージであるため確定的なことは言えないが、距離を離したイメージにのみこのようなプロファイルが観測されているため、屈折コントラストが観測されているものと考えている。これはレーザーコンプトン散乱 X 線は非常に線源サイズが小さく、高品質であることを示す結果である。今後はより X 線数を向上させて統計揺らぎよりも大きくコントラストが付いていることを実証する必要がある。

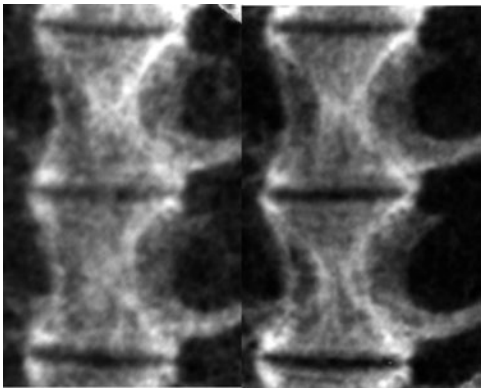


図 12：ホッケの背骨の X 線像（検出器までの距離 370mm（左）670mm（右））

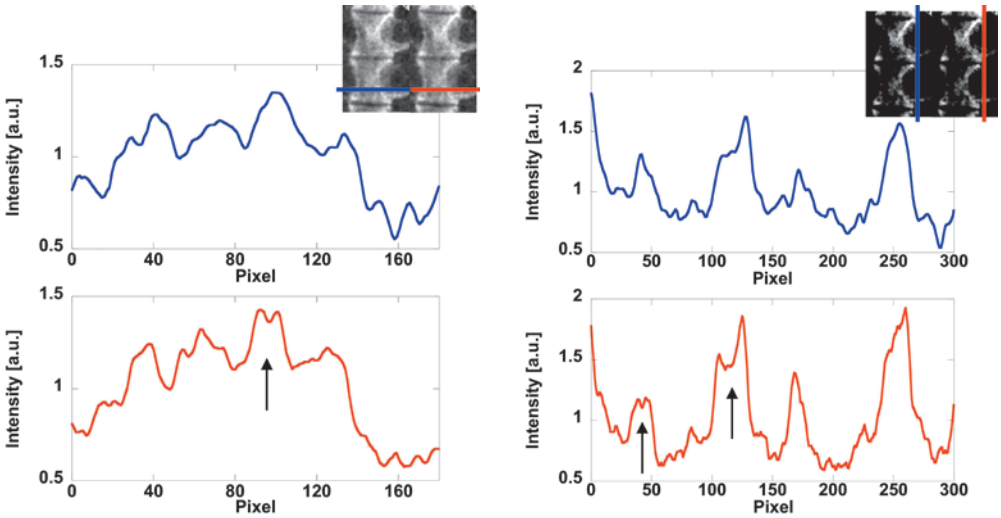


図 13：ホッケの背骨の X 線像のラインプロファイル

4. 総括

昨年度までに準備をしてきたX線検出器によってレーザーコンプトン散乱X線の計測を行い、X線強度及びX線イメージの取得に成功した。分解能としても100μm程度と想定通りであった。さらにX線イメージングにおいて屈折コントラストの観測を試みることによって確定的ではないもののエッジ強調を観測できたと考えている。これらのことから我々の開発してきた光共振器を用いるレーザーコンプトン散乱X線源が非常に高品質かつ高安定であることを示すことができた。

これまでの結果から、1画像の取得に約30分要していた。これは必要としていたレーザー強度として120Jにあたる。現状は40mJであるから約3000倍のレーザー増強を行うことによって同程度のイメージであれば動画計測、1Shot計測が可能であることを示している。今後3000倍を目標に改善を試み、目標としていた1Shotイメージングの達成を目指していくとともにX線のエネルギーや広がり角なども計測していく予定である。

また、次年度は超伝導加速器（STF）を用いたレーザーコンプトン散乱試験も開始される。この試験は時間が限られているため、これまで小型加速器で蓄積してきた知見を活用しX線検出及び評価を行っていく予定である。

開発スタッフ

責任者：鷲尾方一（早稲田大学）

担当者：鷲尾方一、坂上和之（早稲田大学）

参考文献（2011年度中の発表および掲載論文）

[1] “Cs-Te photocathode RF electron gun for applied research at Waseda University” Kazuyuki Sakaue, Hitoshi Hayano, Shigeru Kashiwagi, Ryunosuke Kuroda, Akihiko Masuda, Tatsuya Suzuki, Toshikazu Takatomi, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Masakazu Washio, Nucl. Instrum. Meth. B269 (2011) 2928-2931.

[2] “Experimental results of an rf gun and the generation of a multibunch beam” Abhay Deshpande, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Kazuyuki Sakaue, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Masakazu Washio, Phys. Rev. STAB. 14 (2011) 063501.

[3] “Development of a laser pulse storage technique in an optical super-cavity for a compact X-ray source based on laser-Compton scattering” K. Sakaue, S. Araki, M. Fukuda, Y. Higashi, Y. Honda, N. Sasao, H. Shimizu, T. Taniguchi, J. Urakawa, M. Washio, Nucl. Instrum. Meth. A637 (2011) S107-S111.

[4] “Upgrade of the accelerator for the laser undulator compact X-ray source (LUCX)” M. Fukuda, S. Araki, A. Deshpande, Y .Higashi, Y. Honda, K. Sakaue, N. Sasao, T. Taniguchi, N. Terunuma, J. Urakawa, Nucl. Instrum. Meth. A637 (2011) S67-S71.

[5] “S-band linac-based X-ray source with π/2-mode electron linac” A. Deshpande, S. Araki, T. Dixit, M. Fukuda, R. Krishnan, S. Pethe, K. Sakaue, N. Terunuma, J. Urakawa, M. Washio, Nucl. Instrum. Meth. A637 (2011) S62-S66.

[6] “Progress of high average power, short-pulse laser technology for the Compton X-ray source” Akira Endo, Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Nucl. Instrum. Meth. A637 (2011) S33-S36.

[7] “First Refraction Contrast Imaging via Laser-Compton Scattering X-ray at KEK” International Workshop on X-ray and Neutron Phase Imaging with Gratings, P38, Tokyo, Japan March 2012, Kazuyuki Sakaue, Tatsuro Aoki, Masakazu Washio, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa.

[8] “Design of a chirping cell attached rf gun cavity for ultrashort electron generation” Proceedings of International Particle Accelerator Conference 2011, San Sebastian, Spain September 2011, K.Sakaue, K. Tamai, M. Washio, J. Urakawa.

[9] “STUDY ON ENERGY COMPENSATION BY RF AMPLITUDE MODULATION FOR HIGH INTENSE ELECTRON BEAM GENERATED BY A PHOTOCATHODE RF-GUN” Proceedings of International Particle Accelerator Conference 2011, San Sebastian, Spain September 2011, Y. Yokoyama, T. Aoki, K. Sakaue, T. Suzuki, T. Yamamoto, M. Washio, J. Urakawa, N. Terunuma, H. Hayano, S. Kashiwagi, R. Kuroda.

[10] “DEVELOPMENT OF AN S-BAND MULTI-CELL \\ ACCELERATING CAVITY FOR RF GUN AND BOOSTER LINAC” Proceedings of International Particle Accelerator Conference 2011, San Sebastian, Spain September 2011, T. Aoki, K. Sakaue, M. Washio, A. Deshpande, J. Urakawa, M. Fukuda, N. Kudo, N. Terunuma, T. Takatomi.

[11] “Development of the Pulse Radiolysis System with a Supercontinuum Radiation Using Photonic Crystal Fiber” Proceedings of International Particle Accelerator Conference 2011, San Sebastian, Spain September 2011, K. Ogata, Y. Kawauchi, K. Sakaue, T. Suzuki, Y. Hosaka, R. Betto, M. Washio, S. Kashiwagi, R. Kuroda.

[12] “Design of high brightness laser-Compton light source for EUV lithography research in shorter wavelength region” International Workshop on Extremely Ultraviolet Lithography, Hawaii, USA, June 2011, Kazuyuki Sakaue, Akira Endo, Masakazu Washio.

[13] “Recent progress of a photocathode RF electron gun at Waseda University” 11th Trombay Symposium on Radiation & Photochemistry (TSRP), Mumbai, India, January 2012, Kazuyuki Sakaue, Tatsuro Aoki, Masafumi Fukuda, Hitoshi Hayano, Yuya Koshiba, Toshikazu Takatomi, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Yukihisa Yokoyama, Masakazu Washio.

[14] 「レーザーコンプトン X 線源のための CO_2 レーザー蓄積装置開発」第 8 回加速器学会年会 つくば 2011 年 8 月 坂上和之 , 遠藤彰 , 横山悠久 , 鷲尾 方一 .

[15] 「極短バンチ電子ビーム生成用エネルギーチャープセル付高周波電子銃開発」第 8 回加速器学会年会 つくば 2011 年 8 月 坂上和之 , 青木達朗 , 小柴裕也 , 浦川順治 , 高富俊和 , 鷲尾方一 .

[16] 「フォトカソード RF 電子銃を用いた大強度マルチバンチ電子ビームのバンチ毎エネルギー差補正に関する研究」第 8 回加速器学会年会 つくば 2011 年 8 月 横山悠久 , 浦川順治 , 柏木茂 , 黒田隆之助 , 坂上和之 , 鈴木達也 , 照沼信浩 , 早野仁司 , 山本隆之 , 鷲尾方一 .

[17] 「3.5 cell S-band フォトカソード RF 電子銃及び 12 cell 加速管開発」第 8 回加速器学会年会 つくば 2011 年 8 月 青木達朗 , Abhay Deshpande, 浦川順治 , 工藤昇 , 坂上和之 , 高富俊和 , 照沼信浩 , 福田将史 , 鷲尾方一 .

[18] 「SC 分析光を用いたピコ秒パルスラジオリシスシステムの構築」第 8 回加速器学会年会 つくば 2011 年 8 月 別當良介 , 保坂勇志 , 小方宏一 , 川内洋平 , 坂上和之 , 黒田隆之助 , 柏木茂 , 丑田公規 , 鷲尾方一 .

[19] 「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 (11)」日本物理学会 第67回年次大会 兵庫 2012年3月 坂上和之, 荒木栄, 浦川順治, 笹尾登, 照沼信浩, 福田将史, 本田洋介, 鷲尾方一.
[20] 「極短バンチ生成用高周波電子銃の開発」日本物理学会 第67回年次大会 兵庫 2012年3月 小柴裕也, 青木達朗, 坂上和之, 高富俊和, 浦川順治, 鷲尾方一.
[21] 「早稲田大学におけるスーパーコンティニウム光を用いたパルスラジオリシスシステムの開発」日本物理学会 第67回年次大会 兵庫 2012年3月 川内洋平, 保坂勇志, 別當良介, 小方宏一, 坂本瑞樹, 坂上和之, 黒田隆之助, 柏木茂, 丑田公規, 鷲尾方一.
[22] 「フォトカソード RF-Gun を用いた電子線 Microbeam 生成」日本物理学会 第67回年次大会 兵庫 2012年3月 吉田靖史, 坂上和之, 鷲尾方一.
[23] 「STF 量子ビーム電子銃用ロングパルストレインレーザーシステム開発」高輝度高周波電子銃研究会 つくば 2012年3月 坂上和之.
[24] 「3.6 cell S-band RF Gun 製作およびその性能」高輝度高周波電子銃研究会 つくば 2012年3月 青木達朗.

K. 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
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ために、レーザー蓄積装置と常伝導の加速器を用いたX線の生成試験および利用研究に向けた基盤技術開発を行っている。平成23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 $2x10^5$ photons/sec から 10^8 photons/sec 以上に増強できるように準備を進めた。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設計製作を進めることが決定した。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を進めている。平成24年度秋からのLUCX X線生成実験で、10^8 photons/sec 以上高輝度X線検出を行う。一方、超伝導線形量子ビーム試験加速器が完成したので、平成24年度秋までにレーザー逆コンプトン衝突によるX線検出実験に挑戦する。超伝導加速器の運転・調整は順調に行われている。

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なX線は現状、大型放射光施設から得ており利用が限られている。本プロジェクトではこのような高輝度X線ビームを小型な施設によって生成することを目標とする。実機では超伝導加速空胴によって加速された電子バンチを用いるがその前段階として常伝導加速器から得られるマルチバンチ電子ビームとレーザ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高品質な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ミリ秒のマルチバンチ（162,500 bunches/pulse）電子ビーム生成が確認できた。今後、大電流ビーム加速とX線生成装置設置を2012年夏前に完了する予定である。その状況報告も以下に示す。

2. LUCXでのマルチパルスX線生成実証試験

2008年度、常伝導線形加速器とレーザー蓄積装置を用いたX線生成実証試験は高エネルギー加速器研究機構、先端加速器試験棟内に設置された小型加速器（LUCX）で行われ、その成果は既に報告したので、その後の3年間の装置改造・X線生成再現実験・X線強度増強計画の報告を行う。X線生成再現実験とX線イメージング取得実験には成功したが、図1に示すミラーの破壊により実験を中断することになった。このミラーの破壊原因はミラー上でのレーザー電界強度が閾値を超えたために発生したと推定している。図2はX線生成再現実験で取得したホッケの背骨のX線イメージング写真である。このように鮮明な像を得ることができたのは、X線源のサイズが小さくその光源点が非常に安定している

ことを示している。これは光共振器の位置安定度がサブミクロンレベルであり、被写体との相対値位置のずれも同程度であたので、1 時間程度の逆コンプトン X 線照射でも鮮明な像が得られたのである。この成果により、1000 倍程度の X 線強度増強が行えれば、瞬時に鮮明な X 線像を得ることが可能になる。

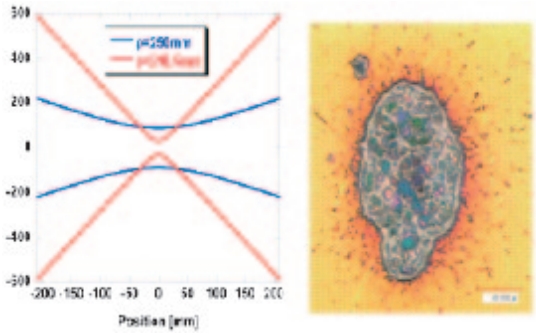


図 1　レーザーによる高反射率ミラー破壊：
ミラー上でレーザー密度が高くなると誘電多層膜の破壊がおきる。破壊部分の大きさは 100μm 程度。

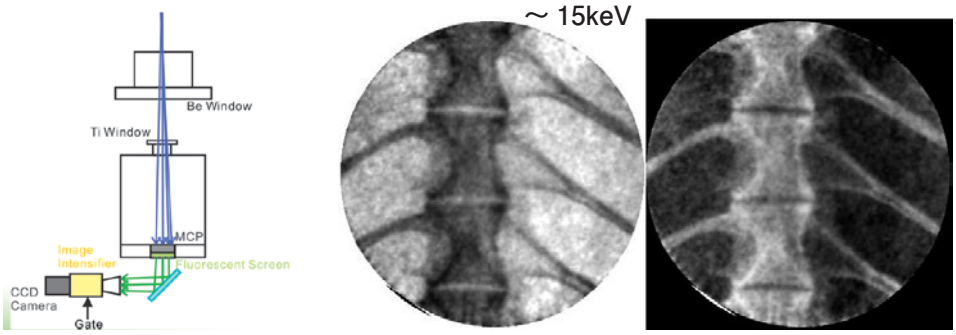


図 2　MCP と CCD Camera を使った X 線検出器とホッケの背骨の X 線イメージ写真。

図 3 に LUCX の性能を 1000 倍以上にするための性能改良構成図を示す。12 cell 定在波加速菅が完成するのは H24 年 6 月中旬であるので、3m 進行波加速菅と入れ替えて 2 か月程度の RF Aging を行うことになる。4 台の 4 極電磁石（2 組の電子ビーム収束用 4 極ダブレット電磁石）によって電子ビーム収束される位置（逆コンプトン相互作用点）を中心にして、4 台の 4 極電磁石も取り込んだ約 2m 長の 4 枚ミラー平面レーザー蓄積装置を設計・製作・設置する。これらの装置が完成するのは H24 年 9 月中旬の予定である。その後電子ビームは 30 度偏向電磁石で CDR（Coherent Diffraction Radiation）実験装置を通過後ビームダンプに捨てられる。逆コンプトン散乱で生成された X 線は Be 窓を通して大気中に取り出され、ビーム加速ライン後方に設置された MCP 検出器で測られる。

既に Burst Amp. によるレーザー増強を試みたが、レーザー増幅媒質の性能が不十分なため 2008 年の増幅率の 2 倍弱で飽和現象が発生した。しかし、新しい Burst Amp. 導入により現状の 4 倍以上にパルスレーザーエネルギーを上げることができた。電子バンチ数を 100 から 1000 に増やす加速器運転調整は、2012 年 10 月までに完了できる。また、電子ビームの Emittance を現状の 4 分の 1 程度に小さく出来ることも新カソードに交換することによって可能であることが測定された。ミラーの反射率を 99.9% 以上に上げ、レーザー最適化を行えば、2012 年 10 月末までに現状の X 線強度の 400 倍以上が実現する。生成 X 線強度を上げながら色々なイメージング装置の試験も X 線検出器開発として推進する。

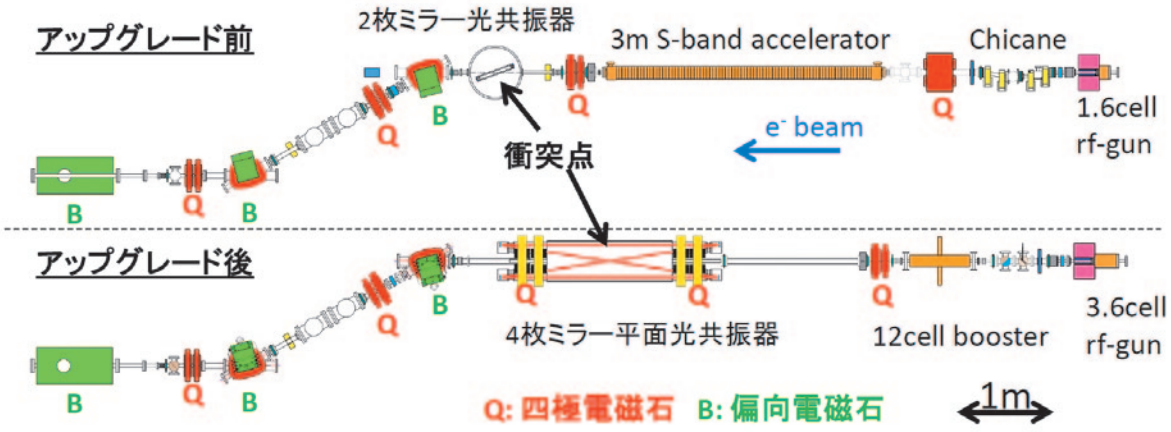


図３　LUCX 小型加速器性能改良構成図

2008 年度に得られた X 線強度から 10^8 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る。

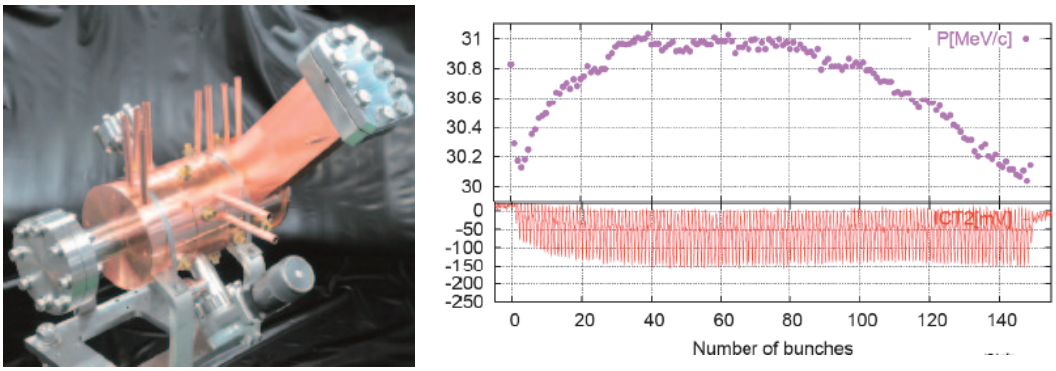


図４　3.6 cell RF Gun による電子ビーム生成加速。
150 bunches/pulse 生成から 1000 bunches/pulse 生成を実現する為、RF Aging を継続している。

3. 新高周波電子源の性能と定在波 12 cell 加速管の製作

新高周波電子源空洞と定在波 booster 加速管設計を行い、空洞製作を進めている。設計では無負荷 Q 値を 20% 程度上げかつ 0-mode と π-mode の周波数差を 10MHz 以上まで拡げることができている。図 4 は最近 100 bunches/pulse から 150 bunches/pulse にした時のバンチ運動量測定結果である。図 5 は 8MeV 以上まで電子ビーム源で加速していることを示す RF 位相スキャン測定結果である。電子ビームの品質が十分に良ければ、ビームダンプまでに発生するビームロスを少なくでき、放射線管理申請変更により 3μC、20μsec 電子パルス幅、10.0MeV ビーム生成加速も認められるようにできる可能性がある。

図 6 は現在製作中の 12 cell S-band booster 加速管の構造図である。2012 年 7 月までに 3m 加速管を 1m 弱の booster 加速管に入れ替える予定である。これによって現状の小型加速器のビーム負荷調整が

容易になる。図 7 は最終製作調整中の booster 加速管の 12 mode 測定結果とロー付け前の組み立て写真である。

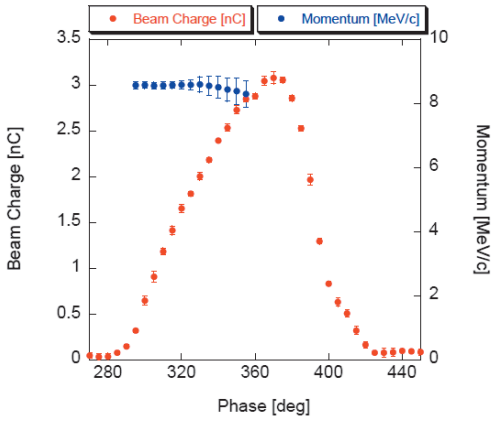


図 5：新規に製作した 3.6 cell RF 電子銃の位相スキャン測定結果。

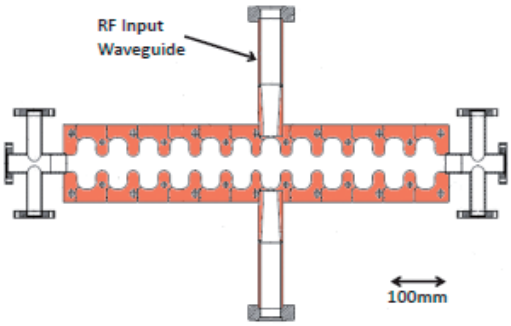


図 6　新規に製作した 12 cell 定在波加速管の装置図。0-mode と π-mode の mode separation は 50MHz 以上である。

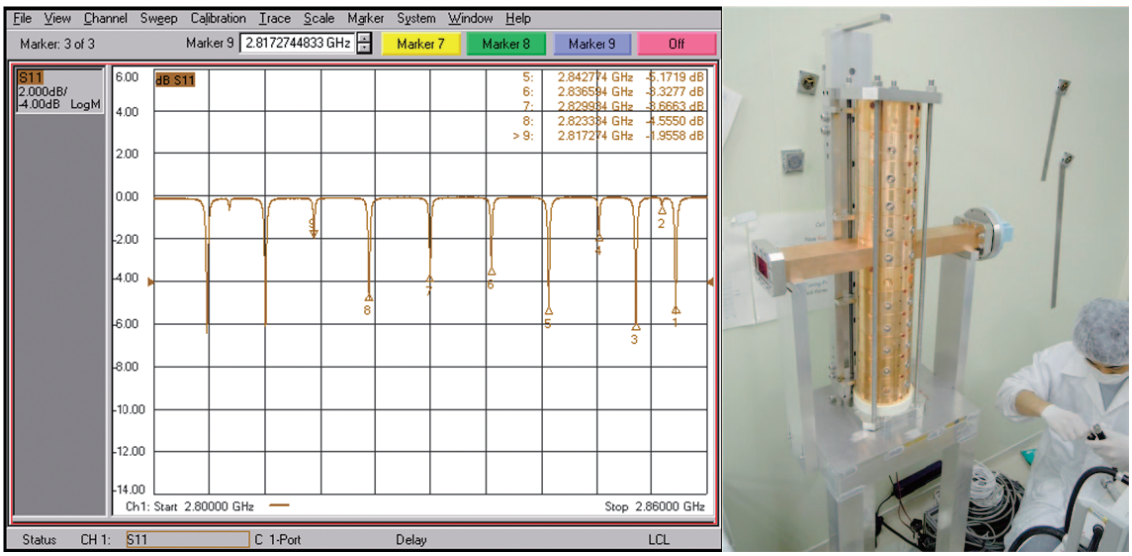


図 7　90cm 12 cell booster の共鳴周波数測定とロー付け前の組み立て写真。

2012 年 3 月までに行った新高周波電子源の性能測定結果は設計値と同等の性能を示し、測定エミッタンスは旧高周波電子源の 1/2 以下にできた。高周波電子源空洞内の最高加速電界は 100MV/m 以上で安定に運転できている。今後、電子源からのビームエネルギーが 10MeV まで到達するように RF Aging と高周波源の調整運転を進める。

ミラー上でレーザーパルスのサイズを大きくする為に、レーザー収束点からのミラーまでの距離を 21cm から 80cm 以上にする。これによってミラー破壊閾値内で 15 倍以上のレーザーエネルギー強度運転を実現する。また、レーザーと電子ビームの衝突角を 20 度から 6 度にする為に、図 8 に示す電子ビーム収束用 4 極ダブレットを取り込んだ 4 枚ミラー平面光共振器を設計・製作することになった。これによって両ビームを 30μm（σ）程度まで絞って衝突させることが可能になる。図 9 は H24 年 9 月中に完成予定の改良 LUCX 高輝度 X 線発生装置の 3D イメージ図である。

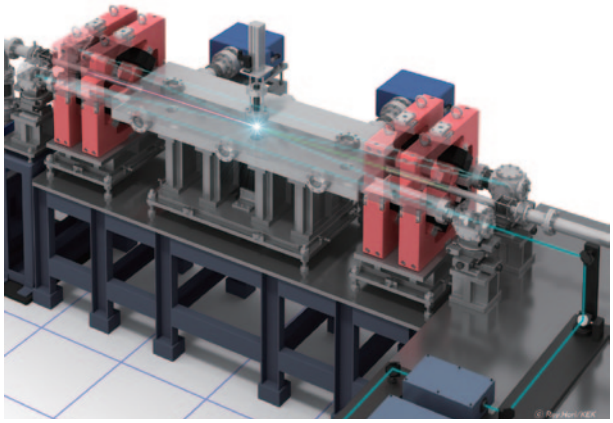


図 8　新 4 枚ミラー平面光共振器

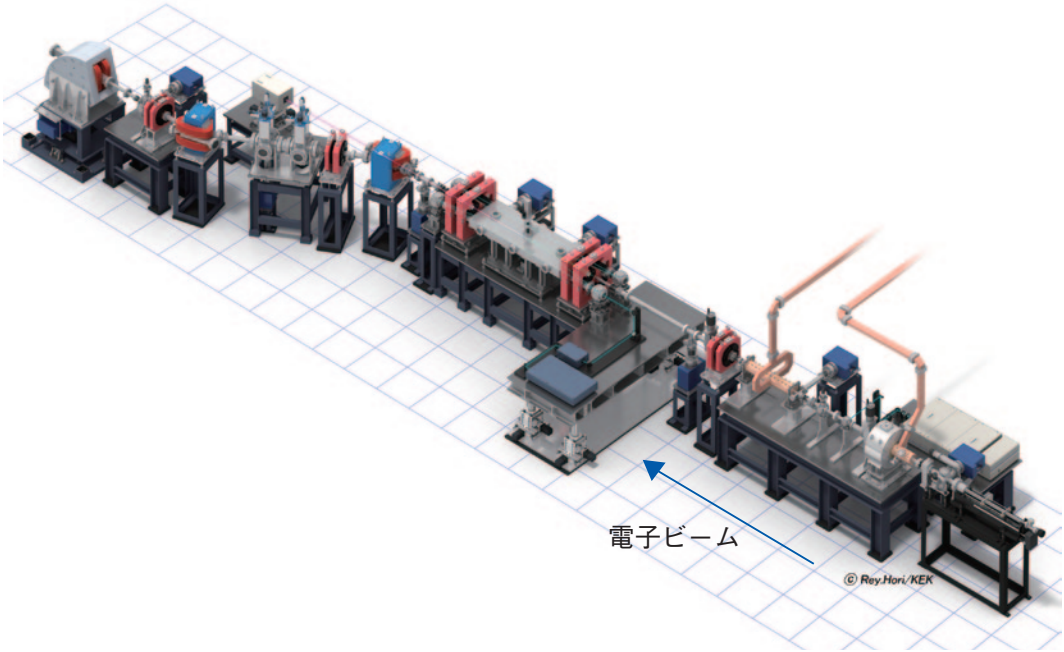


図 9　改良後の LUCX の 3D 図

4. STF 量子ビーム高輝度 X 線生成実証実験計画

9 cell 超伝導加速空洞の試作と改良を繰り返して、大電流電子ビーム加速に使える超伝導空洞製作技術がほぼ確立でき、高輝度X線生成実証試験の空洞製作を終わらせる目処が得られたので、2010 年秋から本実証試験の加速器設計と装置製作・設置に関する情報交換を STF 量子ビーム打合せ（隔週水曜日午前中）で進めて来た。加速器の部分は 2012 年 3 月に完成したので、ここでは加速器の構成、装置性能およびスケジュールについて報告する。

図 10 に STF 量子ビーム実験装置の 3D 配置を示す。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に配置・取り付けも行われている。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 40pC 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、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、1mm 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る。現状は 5mm 厚のミラーを使うことに成っている。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 10μm に絞ってレーザーパルスと衝突させる。

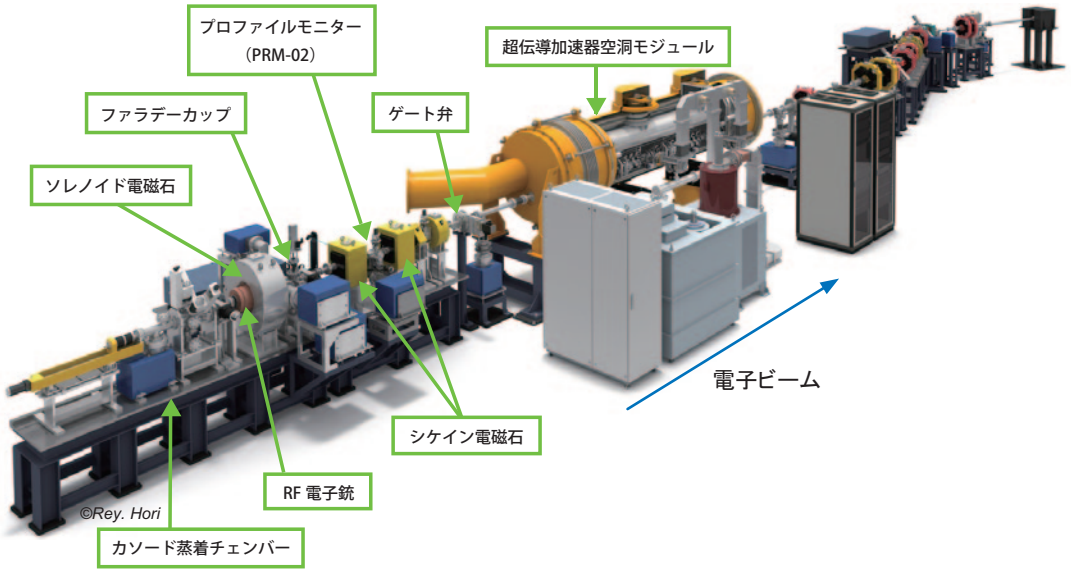


図 10　超伝導線形加速器 STF での高輝度 X 線生成実験装置の 3D 配置図。

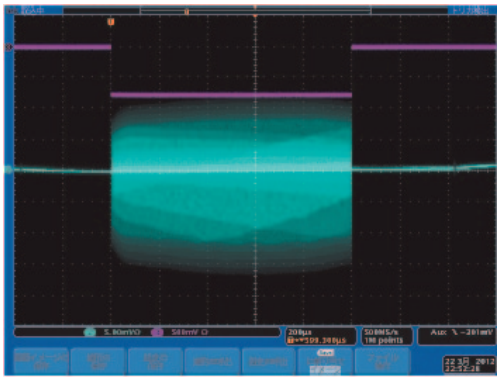


図 11　光高周波電子銃で 1ms Flat Beam（162500 bunches/pulse）生成。
Bunch Charge は 30 ～ 40pC。

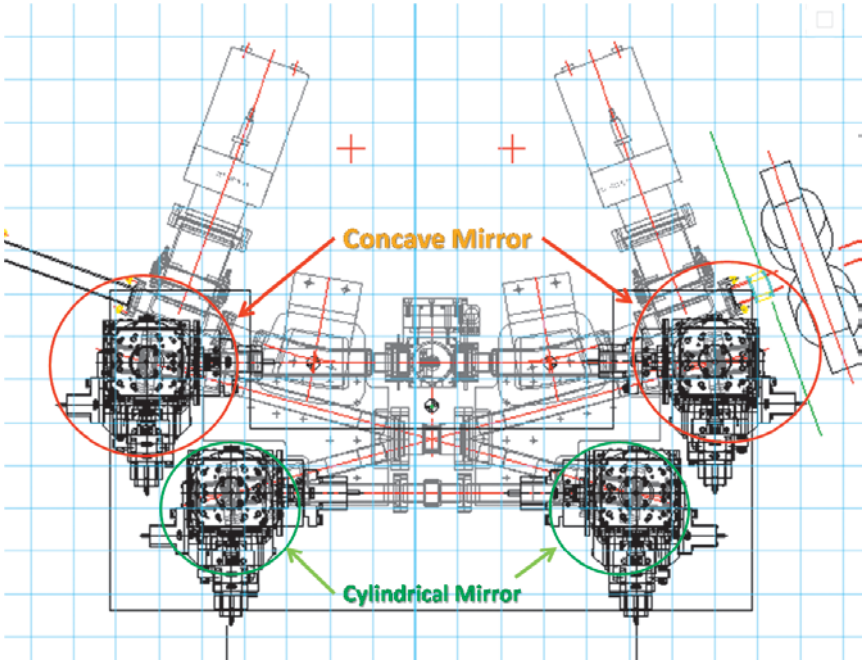


図 12　平面 4 鏡光共振器と電子ビームライン衝突部の配置。
電子ビームは偏向角 20 度の 2 台の偏向電磁石によってレーザーとの正面衝突軌道を通過する。

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。10μm 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ている。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する。本装置の初期アライメントは高精度で行わなければならない。これらのレーザーシステムの設置および試運転は 2012 年 6 月末までに完了しなければならない。

一昨年度（2009 年）から開発している 3 次元 4 鏡光共振器は図 13 に示されているように右偏光と左偏光共鳴状態が分離され、3 枚の 99.99% 反射ミラーと 1 枚の 99.9% レーザー入射平面ミラーによって組み立てられた。この装置は正面衝突用に設計していないので、4 鏡光共振器の安定性を研究するために 2011 年秋に 1.3GeV リング加速器にインストールして、高輝度ガンマ線生成実験に使った。ここで開発した共鳴状態を維持する技術を STF 量子ビーム試験に応用する予定である。衝突点でのレーザーサイズ 14μm でレーザー蓄積増幅率は 1900 倍に設計され、高輝度 gamma-ray 生成実験に使い、世界最高輝度のガンマ線生成に成功した。

光共振器に入力する為の mode lock laser も市販のものを使用しないで開発することになった。開発する最大の理由は、市販のレーザー装置で 100W 級のものを購入する場合、一億円以上の価格であり、最新のファイバーレーザー増幅技術で 100W 級の mode lock laser 発生装置を自作した場合に必要とする経費が 2000 万円以内になることと、若手研究者の教育･先端装置製作訓練テーマとして最新レーザー装置製作は非常に有意義であることによっている。製作するファイバーレーザー mode lock 発振器の出力は 100mW 程度であるので、ファイバーレーザー Pre-AMP によって 3W 程度まで増幅する。主ファイバー増幅器によって 50W 程度に増幅した後、50 倍程度の Burst Amp.（図 15 は開発中の主増幅器と Burst Amp. システムである。）および 3000 倍の 4 枚鏡光共振器で構成することになった。現在、数百 mW, mode lock laser 発振器の製作試験を進めている。2012 年 8 月末までに本システム試験を完了する予定である。

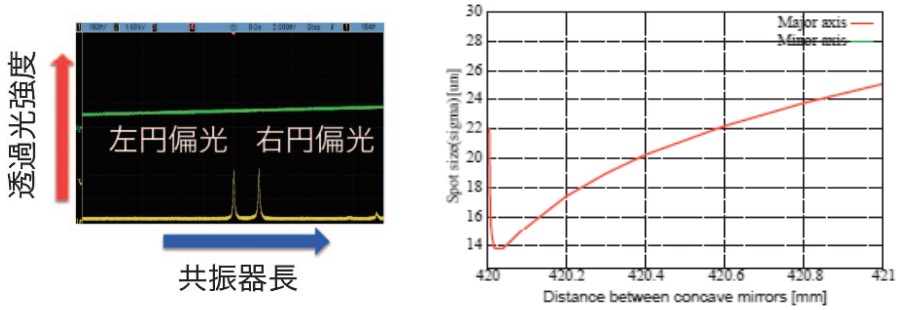


図 13　３次元４鏡光共振器、左右円偏光共鳴分離が可能で衝突点レーザーサイズ（～ 14μm）を小さくできる。

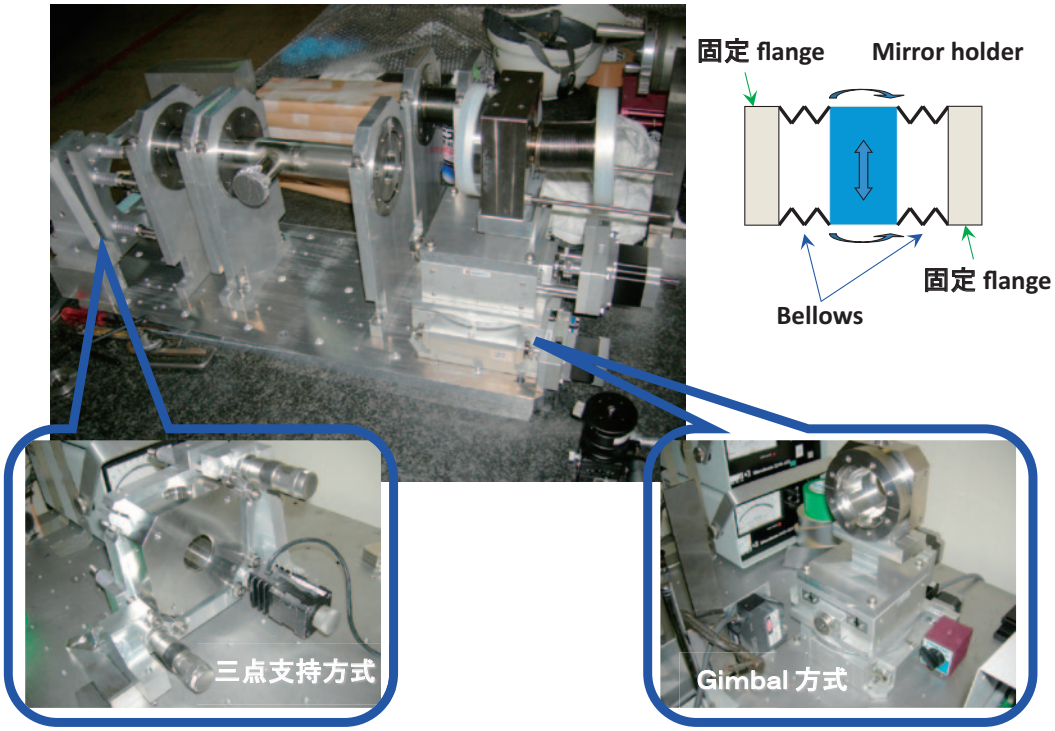


図 14　真空ベローズを介して真空中に固定された高反射率ミラーをミクロン精度で遠隔位置制御できる装置写真。

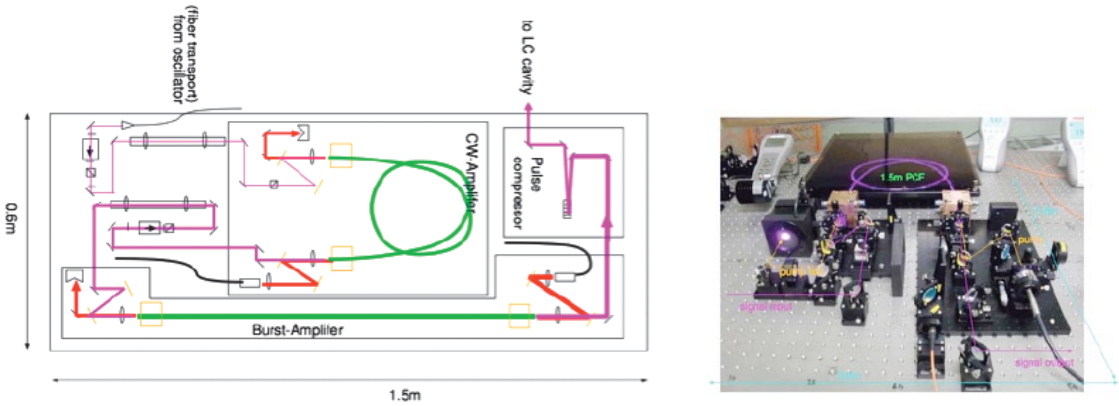


図 15　開発レーザー増幅システム概念図と写真。

5. 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 30μm、10ps のレーザーパルスと 60μm、20ps の電子ビームとの衝突を行い、衝突タイミングを 1ps の精度で、また衝突位置を数 μm の精度で合わせることでＸ線の生成に成功し、基本的な衝突技術は確立されている。衝突タイミングはビームとの同期信号の位相を調整することで合わせている。また、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 10μm になっても問題ない。

今後、今までの 2 枚ミラー共振器から 4 枚ミラー共振器に変えて LUCX でのＸ線生成実験を行い、この共振器での衝突技術の蓄積を行う。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。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線生成実験を行う。この高精度衝突技術の開発と蓄積は非常に重要である。

6. 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 300nC/300nsec 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、5MeV or 10MeV 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線生成実験を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 1.3GeV 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た。そこで 2011 年度末まで電子ビーム・レーザー衝突実験によって、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継続した。

さらに硬Ｘ線生成を現状の LUCX で高輝度化できるように 0.9m 長の S-band booster 加速管（12 cell booster）製作を開始した。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 3m 長の進行波加速管と 2012 年 6 月末までに交換する。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。

本基盤技術開発研究では、実証試験超伝導加速装置を 2012 年春までに完成させて、2012 年秋までの高輝度Ｘ線生成実験によって性能を実証する予定である。2012 年 3 月の電子ビーム運転開始を目指して、高輝度Ｘ線生成装置の建設を進めている。遅くとも 2012 年秋までには高輝度Ｘ線生成実証試験を行い、実用的な小型高輝度Ｘ線源の設計を具体化する。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ている。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 回行い、新たに STF 量子ビーム打合せが始まった。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。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ている。

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・調整に努めている。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努力している。

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 ～ 750kV 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する。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ている。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でいる。

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よう調整していく。

参考文献（2011 年度中の発表および掲載論文）

[1] “Recent progress of the pixel detectors R&D based on the SOI technology”, T. Miyoshi et al., The Technology and Instrumentation in Particle Physics 2011 (TIPP 2011), 9-14 June 2011.

[2] “High Resolution X-ray Imaging Sensor with SOI CMOS Technology”, A. Takeda, Y. Arai et al., The Technology and Instrumentation in Particle Physics 2011 (TIPP 2011), 9-14 June 2011.

[3] H. Sakai, “Overview of CW input couplers for ERL”, Proceedings of 15th SRF workshop, Chicago, 2011, FRIOA05.

[4] K. Umemori et al, “Construction of cERL cryomodules for injector and main linac”, Proceedings of 15th SRF workshop, Chicago, 2011, FRIOA06.

[5] H. Sakai et al., “High power tests of KEK-ERL input coupler for main linac under liquid nitrogen condition”, Proceedings of 15th SRF workshop, Chicago, 2011, TUPO005.

[6] Vertical Test Results on KEK-ERL 9-cell L-band Superconducting cavity（ポスター）
Enrico Cenni, Takaaki Furuya, Hiroshi Sakai, Kensei Umemori, Kenji Shinoe, Masaru Sawamura, 15th International Conference on RF Superconductivity 2011 (SRF2011)

[7] COOLING PROPERTIES OF HOM ABSORBER MODEL FOR CERL IN JAPAN, Masaru Sawamura, Takaaki Furuya, Hiroshi Sakai, Kensei Umemori, Kenji Shinoe, Enrico Cenni , 15th International Conference on RF Superconductivity 2011 (SRF2011).

[8] Progress of SC cavity for KEK-ERL since 2009, Takaaki Furuya, Eiji Kako, Shuichi Noguchi, Masato Sato, Toshiro Shishido, Hiroshi Sakai, Kenji Shinoe, Kensei Umemori, Masaru Sawamura, Enrico Cenni, Ken Watanabe, Y. Yamamoto.

[9] Masao Kuriki, H. Iijima, Y. Masumoto, G. Isoyama, R. Kato, K. Watanabe, H. Hayano, H. Sugiyama, J. Urakawa, Y. Takahashi, S. Kashiwagi, High Power RF Test of L-band RF Gun at KEK-STF, 日本加速器学会年会報告集 , TUPS097, つくば , 8/1-3 (2011).

KEK-STF における L-BAND RF 電子銃の RF 試験 , 第 8 回日本加速器学会年会プロシーディング , つくば (2011).

[10] 磯山悟朗 , 加藤龍好 , 川瀬啓悟 , 杉本尚哉 , 沈傑 , 平田祥 , 藤本蒋輝 , 上司文善 , 大角寛樹 , 杉山陽栄 , 早野仁 , 浦川順治 , 高富俊和 , 栗木雅夫 , 柏木茂 , L バンドフォトカソード RF 電子銃の開発 (IV), 日本加速器学会年会報告集 , TUPS100, つくば , 8/1-3 (2011).

[11] 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 , 近匠 , 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 , 三好修平 , 吉玉仁 , 鷲尾方一 , ILC 偏極陽電子源のための 3 次元 4 枚鏡共振器を用いたガンマ線生成実験 , 日本加速器学会年会 , MOPS119, つくば (2011), 日本加速器学会 2011 年 8 月 .

[12] ERL 主ライナックのためのカプラー開発 -- 試作カプラー 1 号機におけるハイパワー試験 , 篠江憲治 , 阪井寛志 , 梅森健成 , 沢村勝 , 中村典雄 , 古屋貴章 , Enrico Cenni, 第 8 回加速器学会年会 , つくば , 茨城 (2011), TUPS139.

[13] Yoshiharu Yano, Mitsuhiro Yoshida, Hiroaki Katagiri, Takako Miura, Shinichiro Michizono, Shigeki Fukuda, Development of Compact Klystron Drive System and RF Monitor, 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.

[14] Yoshihisa Iwashita, Shigeki Fukuda, Permanent Magnet Focusing for Klystron, 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.

[15] 「極短バンチ電子ビーム生成用エネルギーチャープセル付高周波電子銃開発」第 8 回加速器学会年会 つくば 2011 年 8 月 坂上和之 , 青木達朗 , 小柴裕也 , 浦川順治 , 高富俊和 , 鷲尾方一 .

[16] 「フォトカソード RF 電子銃を用いた大強度マルチバンチ電子ビームのバンチ毎エネルギー差補正に関する研究」第 8 回加速器学会年会 つくば 2011 年 8 月 横山悠久 , 浦川順治 , 柏木茂 , 黒田隆之助 , 坂上和之 , 鈴木達也 , 照沼信浩 , 早野仁司 , 山本隆之 , 鷲尾方一 .

[17] 「3.5 cell S-band フォトカソード RF 電子銃及び 12 cell 加速管開発」第 8 回加速器学会年会 つくば 2011 年 8 月 青木達朗 , Abhay Deshpande, 浦川順治 , 工藤昇 , 坂上和之 , 高富俊和 , 照沼信浩 , 福田将史 , 鷲尾方一 .

[18] Hirotaka Shimizu, Alexander Aryshev, Yasuo Higashi, Yosuke Honda, Junji Urakawa, Development of Pulsed Laser System as a Target for Quantum Beam Technology Program, 第 8 回加速器学会年会 つくば 2011 年 8 月 .

[19] Masafumi Fukuda, Sakae Araki, Alexander Aryshev, Junji Urakawa, Nobuhiro Terunuma, Yosuke Honda, Tatsuro Aoki, Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Noboru Sasao, KEK 小型電子加速器 (LUCX) の現状報告 (5), 第 8 回加速器学会年会 つくば 2011 年 8 月 .

[20] Ryoichi Hajima, Takehito Hayakawa, Michio Seya, Hiroshi Kawata, Yukinori Kobayashi, Junji Urakawa, コンパクト ERL におけるレーザーコンプトン γ 線の発生と核種非破壊測定実証試験の計画 , 第 8 回加速器学会年会 つくば 2011 年 8 月 .

[21] Jinfeng Yang, Takafumi Kondoh, Koichi Kan, Nobuyasu Naruse, Yoshie Murooka, Yoichi Yoshida, Katumi Tanimura, Junji Urakawa, フォトカソード RF 電子銃を用いた MeV 電子顕微鏡の開発 , 第 8 回加速器学会年会 つくば 2011 年 8 月 .

[22] 早野仁司 他 ,「STF の開発状況」第 8 回日本加速器学会年会プロシーディング , つくば (2011).

[23] 三 浦 孝 子 , Dai Arakawa, Hiroaki Katagiri, Toshihiro Matsumoto, Shinichiro Michizono, Yoshiharu Yano, Shigeki Fukuda, 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of

Japan,「DRFSにおけるμTCAデジタルフィードバック系」第8回日本加速器学会年会プロシーディング , つくば (2011).

[24] Compton e+ source overview (Ring+ERL+Linac(*)), Junji Urakawa, POSIPOL 2011, 23-30 August 2011, IHEP, Beijing, China.

[25] Development of the 4-Mirror Compton cavity, Tomoya Akagi et al., POSIPOL 2011, 23-30 August 2011, IHEP, Beijing, China.

[26] Multi-bunch gamma-ray generation by Compton cavity, Tohru Takahashi, POSIPOL 2011, 23-30 August 2011, IHEP, Beijing, China.

[27] High flux polarized positron production: status of the LAL 4 mirrors cavity at the ATF, Nicolas Delerue et al., POSIPOL 2011, 23-30 August 2011, IHEP, Beijing, China.

[28] High energy gamma production: analysis of LAL 4 mirrors cavity data, Iryna Chaikovska et al., POSIPOL 2011, 23-30 August 2011, IHEP, Beijing, China.

[29] Compton ring with laser radiative cooling, Eugene Bulyak et al., POSIPOL 2011, 23-30 August 2011, IHEP, Beijing, China.

[30] 2011年8月29日-9月2日 応用物理学会 , 31a-T-15, SOI技術を用いた放射線イメージセンサーのX線応用 , 三好敏喜 , 新井康夫 .

[31] N. Delerue, J. Bonis, I. Chaikovska, R. Chiche, R. Cizeron, M. Cohen, J. Colin, P. Cornebise, D. Jehanno, F. Labaye, M. Lacroix, R. Marie, Y. Peinaud, V. Soskov, A. Variola, F. Zomer, E. Cormier, R. Flaminio, L. Pinard, S. Araki, S. Funahashi, Y. Honda, T. Omori, H. Shimizu, T. Terunuma, J. Urakawa, T. Akagi, S. Miyoshi, S. Nagata, T. Takahashi, HIGH FLUX POLARIZED GAMMA RAYS PRODUCTION: FIRST MEASUREMENTS WITH A FOUR-MIRROR CAVITY AT THE ATF, Proceedings of IPAC2011, San Sebastián, Spain, TUPO002, 02 Synchrotron Light Sources and FELs, A14 Advanced Concepts, p1446.

[32] H. Shimizu, Y. Higashi, Y. Honda, J. Urakawa, STABLE PLANAR TYPE FOUR-MIRROR CAVITY DEVELOPMENT FOR X-RAY PRODUCTION AS BASIC DEVELOPMENT OF QUANTUM BEAM TECHNOLOGY PROGRAM, Proceedings of IPAC2011, San Sebastián, Spain, TUPO012, 02 Synchrotron Light Sources and FELs, A14 Advanced Concepts, p.1470.

[33] Eugene Bulyak , Junji Urakawa, Frank Zimmermann, FAST COOLING OF BUNCHES IN COMPTON STORAGE RINGS, WEPZ011 Proceedings of IPAC2011, San Sebastián, Spain, 03 Linear Colliders, Lepton Accelerators and New Acceleration Techniques, A14 Advanced Concepts, p.2790.

[34] J. Yang, K. Kan, N. Naruse, Y. Murooka, Y. Yoshida, K. Tanimura, J. Urakawa. FEMTOSECOND PHOTOINJECTOR AND RELATIVISTIC ELECTRON MICROSCOPY, TUPC057 Proceedings of IPAC2011, San Sebastián, Spain, 03 Linear Colliders, Lepton Accelerators and New Acceleration Techniques, T02 Lepton Sources, p.1126.

[35] J. Yang, K. Kan, T. Kondoh, Y. Yoshida, J. Urakawa, PHOTO INJECTOR BASED MeV ELECTRON MICROSCOPY, TUPD85, 09 Others, p. 503.

[36] A. Aryshev, S. Araki, M. Fukuda, J. Urakawa, P. Karataev, G. Naumenko, A. Potylitsyn, L. Sukhikh, D. Verigin, K. Sakaue, Q-FACTOR OF AN OPEN RESONATOR FOR A COMPACT SOFT X-RAY SOURCE BASED ON THOMSON SCATTERING OF

STIMULATED COHERENT DIFFRACTION RADIATION, THPS095, 08 Applications of Accelerators, Technology Transfer and Industrial Relations, U03 Transmutation and Power Generation, p. 3657.

[37] A. Aryshev, N. Terunuma, and J. Urakawa, S. T. Boogert, P. Karataev, D. Howell, SUB-MICROMETER RESOLUTION TRANSVERSE ELECTRON BEAM SIZE MEASUREMENT SYSTEM BASED ON OPTICAL TRANSITION RADIATION, WEOBB01, 06 Beam Instrumentation and Feedback, T03 Beam Diagnostics and Instrumentation, p.1964.

[38] "DEVELOPMENT OF AN S-BAND MULTI-CELL ACCELERATING CAVITY FOR RF GUN AND BOOSTER LINAC", Proceedings of International Particle Accelerator Conference 2011, San Sebastian, Spain September 2011, MOPC020, 07 Accelerator Technology, T06 Room Temperature RF, p. 110, T.Aoki, K.Sakaue, M.Washio, A.Deshpande, J.Urakawa, M.Fukuda, N.Kudo, N.Terunuma, T.Takatomi.

[39] K. Sakaue, K. Tamai, M. Washio, J. Urakawa, TUPC058, 03 Linear Colliders, Lepton Accelerators and New Acceleration Techniques, T02 Lepton Sources, p. 1129, "Design of a chirping cell attached rf gun cavity for ultrashort electron generation" Proceedings of International Particle Accelerator Conference 2011, San Sebastian, Spain September 2011.

[40] "STUDY ON ENERGY COMPENSATION BY RF AMPLITUDE MODULATION FOR HIGH INTENSE ELECTRON BEAM GENERATED BY A PHOTOCATHODE RF-GUN" Proceedings of International Particle Accelerator Conference 2011, San Sebastian, Spain September 2011, Y.Yokoyama, T.Aoki, K.Sakaue, T.Suzuki, T.Yamamoto, M.Washio, J.Urakawa, N.Terunuma, H.Hayano, S.Kashiwagi, R.Kuroda, TUPC059, 03 Linear Colliders, Lepton Accelerators and New Acceleration Techniques, T02 Lepton Sources, p.1132.

[41] I. Chaikovska , C. Bruni, N. Delerue, A. Variola, F. Zomer, K. Kubo, T. Naito, T. Omori, N. Terunuma, J. Urakawa, EFFECT OF COMPTON SCATTERING ON THE ELECTRON BEAM DYNAMICS AT THE ATF DAMPING RING, WEPC051, 05 Beam Dynamics and Electromagnetic Fields, D02 Non-linear Dynamics - Resonances, Tracking, Higher Order, p. 2127.

[42] "RF PROCESSING OF L-BAND RF GUN FOR KEK-STF", M. Kuriki, H. Iijima, Y. Masumoto, G. Isoyama, R. Kato, K.Watanabe, H.Hayano, H. Sugiyama, J. Urakawa, Y. Takahashi, S. Kashiwagi, Proc. 2nd Int. Part. Acc. Conf. (IPAC2011), San Sebastian, Spain, September 2011, 07 Accelerator Technology, T06 Room Temperature RF, p.92, Proc. Of IPAC2011,MOPC014, San Sebastian, Spain, 9/4-9 (2011).

[43] S. Michizono, D.A. Arakawa, S. Fukuda, E. Kako, H. Katagiri, T. Matsumoto, T. Miura, Y. Yano, Performance of LLRF System at S1-Global in KEK, IPAC2011.

[44] T. Miura, D.A. Arakawa, S. Fukuda, E. Kako, H. Katagiri, T. Matsumoto, S. Michizono, Y. Yano, Performance of the Micro-TCA Digital Feedback Board for DRFS Test at KEK-STF, IPAC2011.

[45] Y. Iwashita , S. Fukuda, T. Matsumoto, S. Michizono, M. Yoshida, Development of Permanent Magnet Focusing for Klystrons, IPAC2011.

[46] T. Matsumoto, M. Akemoto, D.A. Arakawa, S. Fukuda, H. Honma, E. Kako, H. Katagiri, S.

Matsumoto, H. Matsushita, S. Michizono, T. Miura, H. Nakajima, K. Nakao, T. Shidara, T. Takenaka, Y. Yano, M. Yoshida, Operation Test of Distributed RF System with Circulator-less Waveguide Distribution in S1-Global Project at STF/KEK, IPAC2011.

[47] A. Bosotti et al., "S1-GLOBAL MODULE TESTS AT STF/KEK", Proc. 2nd Int. Part. Acc. Conf. (IPAC2011), San Sebastian, Spain, September 2011.

[48] N. Ohuchi et al., "THERMAL PERFORMANCE OF THE S1-GLOBAL CRYOMODULE FOR ILC", Proc. 2nd Int. Part. Acc. Conf. (IPAC2011), San Sebastian, Spain, September 2011.

[49] P.V. Tyagi et al., "Effect of current densities on sulfur generation at electropolished niobium surface", Proc. 2nd Int. Part. Acc. Conf. (IPAC2011), San Sebastian, Spain, September 2011.

[50] Compact X-ray source at STF (Super Conducting Accelerator Test Facility) (invited), Junji Urakawa, RREPS' 11, 12-16 September 2011, Royal Holloway, University of London, (Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures).

[51] A few hundred femto-second soft X-ray source by several meter facility, Junji Urakawa, RREPS' 11, 12-16 September 2011, Royal Holloway, University of London, (Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures).

[52] Sub-micrometer transverse electron beam size measurement system using optical transition radiation at KEK-ATF2 beam line, Aryshev, RREPS' 11, 12-16 September 2011, Royal Holloway, University of London, (Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures)

[53] Development of a compact microwave and soft X-ray source in LUCX facility at KEK-ATF, (invited) Aryshev, RREPS' 11, 12-16 September 2011, Royal Holloway, University of London, (Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures).

[54] 赤木智哉 , ILC 偏極陽電子源の為の 3 次元 4 枚鏡共振器を用いたガンマ線生成実験 , 日本物理学会 2011 年秋季大会 弘前市 .

[55] 田中龍太 , 3 次元 4 枚鏡共振器における円偏光蓄積特性を用いたフィードバックの実現 , 日本物理学会 2011 年秋季大会 弘前市 .

[56] 田中龍太 , ILC 偏極陽電子源の為の 4 枚鏡共振器の開発 共振器の共鳴維持制御技術 , 日本物理学会 2011 年秋季大会 弘前市 .

[57] 2011 年 9 月 15-18 日 , 日本物理学会 , 18aSE-2, 積分型 SOI 検出器の X 線イメージングセンサとしての性能評価 武田彩希, 新井康夫, 他 SOIPIX グループ .

[58] 2011 年 9 月 15-18 日 , 日本物理学会 , 17aSE-3, SOI ピクセル検出器用チップ読み出しボード SEABAS2 の開発 II, 田内一弥, 新井康夫, 他 SOIPIX グループ .

[59] 2011 年 9 月 20-23 日 , 日本物理学会 , 23aJA-13, SOI 技術を用いた放射線ピクセルセンサーの X 線応用 , 三好敏喜, 他 SOIPIX グループ .

[60] Compton Ring R&D overview, Junji Urakawa, LCWS11, International Workshop Future Linear Colliders, 26-30 September 2011, Palacio de Exposiciones y Congresos, Granada, Spain.

[61] Status of Hiroshima-KEK Compton Experiment at ATF, T. Takahashi, LCWS11, International Workshop Future Linear Colliders, 26-30 September 2011, Palacio de Exposiciones y Congresos, Granada, Spain.

[62] Mighty Laser: a 4-mirror optical cavity for polarised e+ generation, Fabian Zomer, LCWS11, International Workshop Future Linear Colliders, 26-30 September 2011, Palacio de

Exposiciones y Congresos, Granada, Spain.

[63] Pulsed laser wire development for damping rings - Junji URAKAWA, Low Emittance Rings Workshop 2011 (LowERing2011) from Sunday, October 2, 2011 (08:00) to Wednesday, October 5, 2011 (18:30).

[64] Development of main linac cavity for cERL project（ 口 頭), Kensei Umemori, Takaaki Furuya, Hiroshi Sakai, Masato Sato, Kenji Shinoe, Masaru Sawamura , Enrico Cenni, The 50th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linac (ERL2011).

[65] Development of input coupler for compact ERL main linac（口頭), Hiroshi Sakai, Takaaki Furuya, Masato Sato, Kenji Shinoe, Kensei Umemori, Masaru Sawamura, Enrico Cenni, The 50th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linac (ERL2011).

[66] Vertical test diagnostics and simulations study for 9-cell cERL cavities, Enrico Cenni, Takaaki Furuya, Hiroshi Sakai, Masato Sato, Kenji Shinoe, Kensei Umemori, Masaru Sawamura, The 50th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linac (ERL2011).

[67] HOM properties of main linac for cERL in Jalan（口頭), Masaru Sawamura, Takaaki Furuya, Hiroshi Sakai, Masato Sato, Kenji Shinoe, Kensei Umemori, Enrico Cenni, The 50th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linac (ERL2011).

[68] Performance Evaluation of KEK Tuner, Kazuhiro. Enami, Takaaki. Furuya, Hiroshi Sakai, Masato Sato, Kenji Shinoe, Kensei Umemori, Nobuhiko Sato, Masaru Sawamura, Enrico Cenni, The 50th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linac (ERL2011).

[69] Cryomodule of KEK main linac cavity, Takaaki Furuya, Hiroshi Sakai, Kenji Shinoe, Kensei Umemori, Masaru Sawamura, Enrico Cenni, The 50th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linac (ERL2011).

[70] “Test Results of X-Ray Imaging Sensor with SOI CMOS Technology”, A. Takeda, Y. Arai et al., The 2011 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference, and 18th International Workshop on Room-Temperature Semiconductor X-ray and Gamma-ray Detectors, the Conference Center, Valencia, Spain, 23-29 October 2011.

[71] “Performance study of monolithic pixel detectors fabricated with FD-SOI technology” , T. Miyoshi et al., Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2011 IEEE, 23-29 October 2011, On Pages 1702 – 1707, Conference Publications.

[72] “SOI Pixel Technology”, Y. Arai, 8th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors, Taipei, Taiwan, 5-8 December 2011.

[73] “P-in-n and n-in-p sensor performance study of SOI monolithic pixel detectors”, T. Miyoshi, 8th International “Hiroshima” Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors, Taipei, Taiwan, 5-8 December 2011.

[74] “Recent progress of a photocathode RF electron gun at Waseda University” 11th Trombay Symposium on Radiation & Photochemistry (TSRP-2012), Mumbai, India,1/4-7, January 2012, Kazuyuki Sakaue, Tatsuro Aoki, Masafumi Fukuda, Hitoshi Hayano, Yuya Koshiba,

Toshikazu Takatomi, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Yukihisa Yokoyama, Masakazu Washio.

[75] ERL 主加速部超伝導空洞の開発 , 梅森健成 , 阪井寛志 , 佐藤昌人 , 沢村勝 , 篠江憲治 , 古屋貴章 , Enrico Cenni, 第 25 回放射光学会年会 , 1/6-1/9, 鳥栖市民文化会館・中央公民館 .

[76] ERL 主ライナック試作カプラー 1 号機のハイパワー試験（ポスター）, 篠江憲治 , 阪井寛志 , 梅森健成 , 沢村勝 , 中村典雄 , 古屋貴章 , Enrico Cenni, 第 25 回放射光学会年会 .

[77] ERL 主加速部クライオモジュールの開発（ポスター）, 阪井寛志 , 梅森健成 , 佐藤昌人 , 沢村勝 , 篠江憲治 , 古屋貴章 , Enrico Cenni, 第 25 回放射光学会年会 .

[78] “First Refraction Contrast Imaging via Laser-Compton Scattering X-ray at KEK” International Workshop on X-ray and Neutron Phase Imaging with Gratings, P38, Tokyo, Japan March 2012, 5 日から 7 日 , Kazuyuki Sakaue, Tatsuro Aoki, Masakazu Washio, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa.

[79] ERL Cryomodule Development in Japan -- Progress with SRF cavities for ERL project, Hiroshi Sakai, Takaaki Furuya, Eiji Kako, Shuichi Noguchi, Masato Satoh, Toshio Shishido, Ken Watanabe, Yasuchika Yamamoto, Kensei Umemori, Kenji Shinoe, Masaru Sawamura, Enrico Cenni, ICFA Workshop on Future Light Sources, 2012 (FLS2012), ICFA Workshop on Future Light Sources, March 5-9, 2012. Thomas Jefferson National Accelerator Facility, Newport News, VA.

[80] 「STF 量子ビーム電子銃用ロングパルストレインレーザーシステム開発」高輝度高周波電子銃研究会 つくば 2012 年 3 月 8 日から 9 日 , 坂上和之 .

[81] 「3.6 cell S-band RF Gun 製作およびその性能」高輝度高周波電子銃研究会 つくば 2012 年 3 月 青木達朗 .

[82] ERL 用超伝導加速空洞の開発（口頭 , 招待講演）, 阪井寛志 , 江並和宏 , 古屋貴章 , 加古永治 , 野口修一 , 佐藤昌人 , 篠江憲治 , 宍戸寿郎 , 梅森健成 , 渡辺謙 , 山本康史 , 沢村勝 , Enrico Cenni, 日本物理学会　第 67 回年会 , 25 日から 28 日 .

[83] 赤木智哉 , ILC 偏極陽電子源の為の 4 枚鏡共振器の開発共振器設計と設置 , 日本物理学会第 67 回年次大会 .

[84] 「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 (11)」日本物理学会 第 67 回年次大会 兵庫 2012 年 3 月 坂上和之 , 荒木栄 , 浦川順治 , 笹尾登 , 照沼信浩 , 福田将史 , 本田洋介 , 鷲尾方一 .

[85] 「極短バンチ生成用高周波電子銃の開発」日本物理学会 第 67 回年次大会 兵庫 2012 年 3 月 小柴裕也 , 青木達朗 , 坂上和之 , 高富俊和 , 浦川順治 , 鷲尾方一 .

[86] 2012 年 3 月 24-27 日 , 日本物理学会 , 27aFB-5, SOI 技術を用いた積分型ピクセルセンサーの基本特性評価 , 三好敏喜, 他 SOIPIX グループ .

[87] 栗木雅夫 , 飯島北斗 , 増元勇騎, 細田誠一 , 浦川順治 , 早野仁司 , 渡邊謙 , 杉山陽栄 , 倉本綾佳 , 高橋義知 , 磯山悟朗 , 加藤龍好 , 柏木茂 , 坂上和之 , KEK-STF における L-band Rf 電子銃によるマルチバンチ生成 , 日本物理学会年会 , 27aGB-1, 関西学院大学 , 3/24-27/20012.

[88] 川瀬啓悟 , 加藤龍好 , 入澤明典 , 沈傑 , 平田祥 , 藤本将輝 , 上司文善 , 大角寛樹 , 磯山悟朗 , 杉山陽栄 , 渡邊謙 , 早野仁司 , 浦川順治 , 高富俊和 , 栗木雅夫 , 柏木茂 , L バンドフォトカソード RF 電子銃の開発 (V), 日本物理学会年会 , 27aGB-8, 関西学院大学 , 3/24-27/20012.

[89] "Development of SOI pixel process technology", Y. Arai, et al., Nucl. Instr. And Meth. A636, Issue 1, Supplement, 21 April 2011, Pages S31–S36.

[90] "Performance study of SOI monolithic pixel detectors for X-ray application", T. Miyoshi et al., Nucl. Instr. And Meth. A636, Issue 1, Supplement, 21 April 2011, Pages S237–S241.

[91] "Cs-Te photocathode RF electron gun for applied research at Waseda University" Kazuyuki Sakaue, Hitoshi Hayano, Shigeru Kashiwagi, Ryunosuke Kuroda, Akihiko Masuda, Tatsuya Suzuki, Toshikazu Takatomi, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Masakazu Washio, Nucl. Instrum. Meth. B269 (2011) 2928-2931.

[92] "Experimental results of an rf gun and the generation of a multibunch beam" Abhay Deshpande, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Kazuyuki Sakaue, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Masakazu Washio, Phys. Rev. STAB. 14 (2011) 063501.

[93] "Development of a laser pulse storage technique in an optical super-cavity for a compact X-ray source based on laser-Compton scattering" K. Sakaue, S. Araki, M. Fukuda, Y. Higashi, Y. Honda, N. Sasao, H. Shimizu, T. Taniguchi, J. Urakawa, M. Washio, Nucl. Instrum. Meth. A637 (2011) S107-S111.

[94] "Upgrade of the accelerator for the laser undulator compact X-ray source (LUCX)" M. Fukuda, S. Araki, A. Deshpande, Y .Higashi, Y. Honda, K. Sakaue, N. Sasao, T. Taniguchi, N. Terunuma, J. Urakawa, Nucl. Instrum. Meth. A637 (2011) S67-S71.

[95] "S-band linac-based X-ray source with π/2-mode electron linac" A. Deshpande, S. Araki, T. Dixit, M. Fukuda, R. Krishnan, S. Pethe, K. Sakaue, N. Terunuma, J. Urakawa, M. Washio, Nucl. Instrum. Meth. A637 (2011) S62-S66.

[96] T. Akagi, S. Araki, J. Bonis, I. Chaikovska, R. Chiche, R. Cizeron, M. Cohen, E. Cormier, P. Cornebise, N. Delerue, R. Flaminio, S. Funahashi, D. Jehanno, Y. Honda, F. Labaye, M. Lacroix, R. Marie, C. Michel, S. Miyoshi, S. Nagata, T. Omori, Y. Peinaud, L. Pinard, H. Shimizu, V. Soskov, T. Takahashi, R. Tanaka, T. Terunuma, J. Urakawa, A. Variola, F. Zomer "Production of gamma rays by pulsed laser beam Compton scattering off GeV-electrons using a non-planar four-mirror optical cavity", Journal of Instrumentation, Vol7 No1 P01021.

[97] "Performance study of monolithic pixel detectors fabricated with FD-SOI technology", T. Miyoshi et al., Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2011 IEEE, 23-29 October 2011, On Pages 1702 – 1707, Conference Publications.

[98] Compact X-ray source at STF (Super Conducting Accelerator Test Facility), IOP Science, J. Phys.: Conf. Ser., 012035-1, -4, Junji Urakawa.

[99] Several hundred femto-second soft X-ray source in compact several meter facility, IOP Science, J. Phys.: Conf. Ser., 012038-1, -5, Junji Urakawa.

[100] "Development of a compact X-ray source based on Compton scattering using a 1.3 GHz superconducting RF accelerating linac and a new laser storage cavity", Junji Urakawa, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 637 (2011) S47–S50.

[101] "Femtosecond pulse radiolysis and femtosecond electron diffraction", Jinfeng Yang et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 637 (2011) S24–S29.