

# 平成21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22年5月28日

大学共同利用機関法人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、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構が実施した平成21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。

## 目次

1. 委託業務の目的	04
2. 平成21年度（報告年度）の実施内容	04
2.1. 実施計画	04
2.2. 実施内容（成果）	06
A. パルス超伝導加速空洞技術の開発 KEK、早野グループ	06
B. CW超伝導加速空洞技術の開発 KEK、古屋グループ	13
C. 電子ビーム・レーザー衝突技術の開発（システム統合化）KEK、照沼グループ、浦川グループ	20
D. X線検出装置の実用化開発 KEK、幅グループ	28
E. 小型高信頼性L-band高周波源開発 KEK、福田グループ	32
F. プロジェクトの総合的推進 KEK、浦川グループ	35
2.3. 成果の外部への発表	36
2.4. 活動（運営委員会等の活動等）	42
2.5. 実施体制	44

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

2009年度から以上の目的に大強度安定化に必要な次の技術開発を加える。500~750kV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21年度(報告年度)の実施内容

### 2. 1. 実施計画

#### A. 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空洞の製作を開始して、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せ、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。

#### B. 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、日本原子力研究開発機構と連携して、直流高圧電子源と組み合わせて使用するCW超伝導加速空洞を2008年度に試作したので、その空洞試験の準備を整える。

### C. 電子ビーム・レーザー衝突技術の開発（システム統合化）

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線生成実験を行う。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、2010年度に生成軟X線を使った実用試験を行う。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。

### D. 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。

### E. 小型高信頼性L-band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する。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開発する。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い、2010年度に本試験装置を組み立て、必要な性能試験を行う。そして2011年度に実用試験装置を製作する。

### F. プロジェクトの総合的推進

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。

## 2. 2. 実施内容（成果）

### A. 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 年度完成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た高電界を出せるものである。大きなビームアパーチャーはビーム通過による高調波モードの減衰にも有利である。実用化に必要な高電界化と高次モード減衰の開発研究のため、HOM ダンパー付き 2 セル空洞および 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を行なった。平成 21 年度の最も重要な成果は、HOM ダンパー付き 2 セル空洞および HOM ダンパー付 9 セル加速空洞を縦型試験クライオスタットに装備して高電界試験を行い、初期の性能を達成した事である。これは表面処理工程と空洞アセンブリー工程に改善の効果があつた事を示している。次年度の目標は、これらの結果を組入れた実機の製作に取り掛かる予定である。

#### 1. 9セル超伝導空洞の開発

ビーム加速に使用する超伝導加速空洞は、加速効率を上げるために加速セルを多連化して、かつ HOM を減衰させる構造を持たせ、かつビーム通過アパーチャーを拡げてウェーク場の影響を極小化するような加速構造とする設計である。材質は高純度のニオブ材を使用し、成形はプレス加工、バルジ加工などにより行い、溶接部での不純物混合やボイドなどを避けるため真空中での電子ビーム溶接により製作していく。高い加速勾配を得るためにさらに重要なのは RF 場がかかる空洞内面の平滑度と清浄度である。製造過程で平滑度を保ち、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コンタミの付着を無くする事が重要である。本開発では、このような 9 セル加速空洞を製作し、その機械強度測定や高周波特性測定を行なって、製作誤差の評価と内面平滑度の評価を行う。さらに表面処理を行ないその内面検査を行なって、表面処理の評価を行い、最終的に高電界試験を行う。図 1 に開発中の 9 セル加速空洞の縦型高電界試験結果の 1 例を示す。この例では 37.8MV/m の高電界まで加速電場を上げる事ができた事を示している。ニオブ材料と使用している高周波の周波数および空洞形状で決まる限界値は 40MV/m 付近と推定されているが、それに近い性能まで到達している。

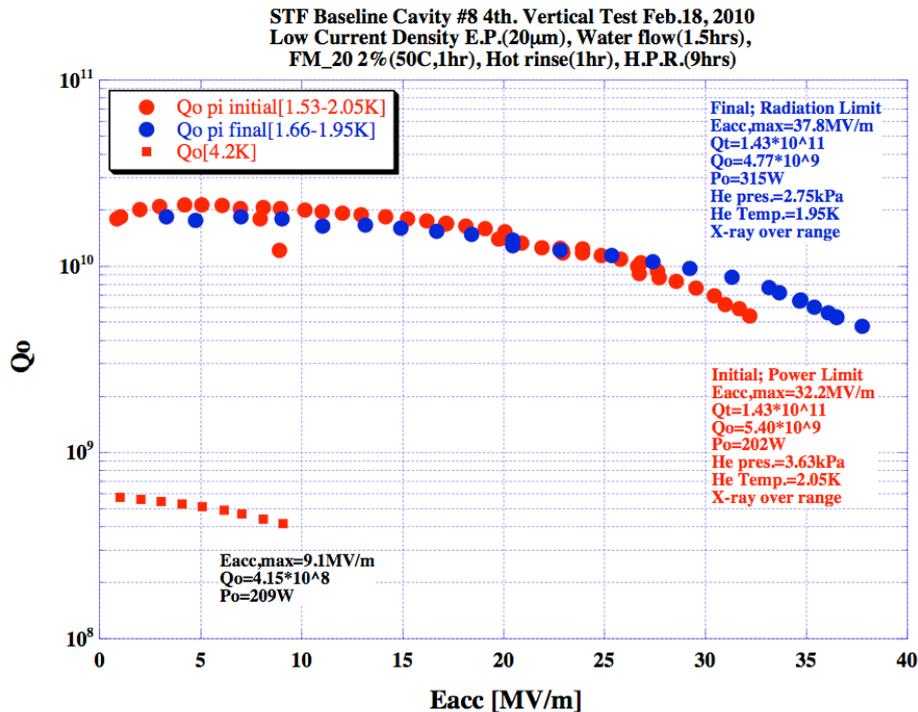


図 1 : 9セル加速空洞 MHI-008 の縦測定結果

## 2. 2セル超伝導空洞の開発

より大電流の加速を行なう時の問題点はビーム加速に供する高周波大電力を空洞に供給する必要がある事、また、その大電流により励起される HOM のパワーを効率よく取出す事である。これを両立させるためには、HOM の引き出しを容易にする極小連結セルである2セルを採用した。大電力を扱う事のできる入力カップラーを多数装備してより大電力を空洞に供給できるようにし、効率よく HOM にカップルできる HOM ダンパーを数多く配置し、それらをシンメトリーに配置してウェーク場の偏りをさける構造とした。図 2 に示した試作空洞は入力カップラー2台と HOM 取出カップラーを5台装着しているものである。本年度の開発研究においてこのような2セル加速空洞の試作開発を行なった。

本年度に試作された2セル空洞を縦型クライオスタットに設置して高電界試験がおこなわれた。その結果を図3に示す。温度 2K での電界性能は 43.7MV/m まで到達し、初期の性能目標 15MV/m を大きく上回った。Q 値が低く測定されているのは、この測定のためだけに装着しているアンテナつきステンレス製端板の高周波ロスから発生しているもので、空洞そのものの性能ではない。



図 2 : 2セル加速空洞

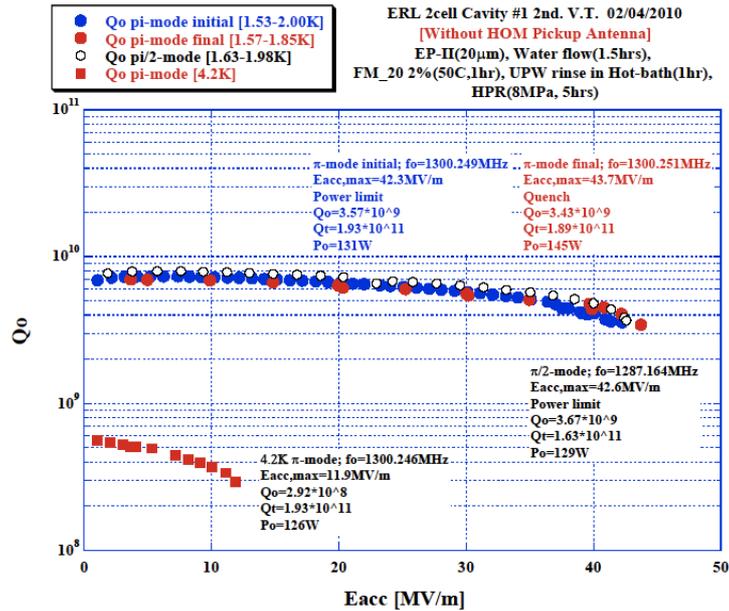


図3：2セル加速空洞の縦型高電界試験結果

### 3. 超伝導空洞の横置きクライオスタット試験

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

本開発研究の関連研究であるビーム加速のための試験として横置きクライオスタットに装着した9セル超伝導空洞のパルスRF運転試験が準備中である。ここでは、各種のピエゾチューナーが試験される予定であり、かつ各種の性能の空洞8台のばらつきのある電界性能のバランスをとって1台のRF源から大電力を供給する試験も行なわれる。図4にその組立状況の写真を示す。ブレードチューナーとサクレ型チューナーのそれぞれにピエゾチューナーを組込んでいるところである。21年度中は、横置きクライオスタットへの組付け準備をおこなっていて、冷却して大電力試験を行なうのは22年度になる予定である。



図4：ブレードチューナーとサクレ型チューナーの空洞への取付を行なっているところ。ピエゾチューナーの動作原理がそれぞれ異なっており、その性能比較により、よりよいチューナーの開発を行なう事ができる。

#### 4. 総括

平成21年度の最も重要な成果は、9セル空洞と2セル空洞の試作を行い、縦型高電界試験においてそれぞれ37.8MV/m、43.7MV/mの高電界で運転したことである。あわせて、空洞の試作を通じ製作コスト削減方法の検討資料を作成した。また、加速器運転時に必要となるローレンツ・デチューン補正の試験のために、各種のピエゾチューナーを試験する横型クライオスタット高電界試験装置を組立中である。次年度の目標は、これら試作した9セル空洞、2セル空洞をもとに実機の製作に取り掛かる予定である。

#### 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：野口修一、加古永治、佐伯学行、山本康史、渡邊謙、宍戸寿郎、佐藤昌史（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）

#### 参考文献

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

- [2] 加古永治、宍戸寿郎、野口修一、早野仁司、渡辺 謙、「STFベースライン超伝導空洞用大電力高周波入力結合器」第3回日本加速器学会年会プロシーディング、仙台(2006) p136-138.
- [3] 野口修一、梅森健成、加古永治、阪井寛志、宍戸寿郎、篠江憲治、早野仁司、山本康史、渡辺 謙、文 成益、徐 慶金、「STFベースライン超伝導空洞システムの開発」第3回日本加速器学会年会プロシーディング、仙台(2006) p133-135.
- [4] 宍戸寿郎、加古永治、野口修一、早野仁司、渡辺謙、「STFベースライン超伝導空洞における加速モードの周波数調整」第3回日本加速器学会年会プロシーディング、仙台(2006) p865-867.
- [5] 渡辺 謙、加古永治、宍戸寿郎、野口修一、早野仁司、「ILCベースラインのための超伝導空洞の高調波モードに関する研究」第3回日本加速器学会年会プロシーディング、仙台(2006) p877-879.
- [6] 宍戸寿郎、梅森健成、加古永治、野口修一、早野仁司、山本康史、阪井寛志、篠江憲治、渡辺 謙、「STFベースライン超伝導空洞における加速モードの周波数調整と性能測定」第4回日本加速器学会年会プロシーディング、和光(2007) p452-454.
- [7] 渡辺 謙、加古永治、宍戸寿郎、野口修一、早野仁司、「ILC超伝導空洞のための高調波モードに関する研究」第4回日本加速器学会年会プロシーディング、和光(2007) p457-459.
- [8] 加古永治、野口修一、早野仁司、宍戸寿郎、佐藤昌史、渡辺 謙、山本康史、「STFにおけるTESLA-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.
- [9] 山本康史、加古永治、佐藤昌史、宍戸寿郎、野口修一、早野仁司、渡辺 謙、「STFベースライン空洞におけるローレンツデチューニングの観測とモデル計算との比較」第5回日本加速器学会年会プロシーディング、東広島(2008) p215-218.
- [10] 山本康史、加古永治、佐藤昌史、宍戸寿郎、野口修一、早野仁司、渡辺 謙、「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.
- [11] 加古永治、「超伝導空洞の高周波設計」高エネルギー加速器セミナー OHO '06テキスト、(2006) 7章 p1-29.
- [12] 加古永治、佐藤昌史、宍戸寿郎、野口修一、羽鳥浩文、早野仁司、山本康史、渡辺 謙、「STFにおけるTESLA-like空洞のクライオモジュール試験」加速器学会誌「加速器」Vol. 5, No. 2, (2008) p117-126.
- [13] 渡辺 謙、「超伝導9セル加速空洞の高次モードに関する研究」博士課程学位論文、(2008) 総合研究大学院大学 高エネルギー加速器科学研究科
- [14] K. Watanabe, H. Hayano, S. Noguchi, E. Kako, T. Shishido, "Higher Order Mode Study of Superconducting Cavity for ILC Baseline", Proc. of EPAC2006, Edinburgh, Scotland (2006) p747-749.
- [15] E. Kako, H. Hayano, S. Noguchi, T. Shishido, K. Watanabe, Y. Yamamoto, "Construction of the Baseline SC Cavity System for STF at KEK", Proc. of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA (2007) p2107-2109.
- [16] K. Sennyu, H. Hara, M. Matsuoka, "Design and Fabrication of Superconducting Cavities for STF", Proc. of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA (2007) p2674-2676.
- [17] E. Kako, H. Hayano, S. Noguchi, N. Ohuchi, M. Sato, T. Shishido, K. Watanabe, Y. Yamamoto, "Cryomodule Tests of the STF Baseline 9-cell Cavities at KEK", Proc. of EPAC2008, Genoa, Italy (2008) p868-870.
- [18] Y. Yamamoto, H. Hayano, E. Kako, S. Noguchi, M. Sato, T. Shishido, K. Umemori, K. Watanabe, H. Sakai, K. Shinoe, S. I. Moon, Q. J. Xu, "Cavity Diagnostic System

- for the Vertical Test of the STF Baseline 9-cell Cavity at KEK” , Proc. of EPAC2008, Genoa, Italy (2008) p643-645.
- [19] K. Sennyu, H. Hara, M. Matsuoka, T. Yanagisawa, “Status of the Superconducting Cavity Development for ILC at MHI” , Proc. of EPAC2008, Genoa, Italy (2008) p463-465.
- [20] S. Noguchi, E. Kako, K. Watanabe, K. Sennyu, “STF Baseline Cavities and RF Components” , Proc. of SRF2005, Ithaca, New York, USA (2005) ThP30.
- [21] S. Noguchi, “Review of New Tuner Designs” , Proc. of SRF2007, Beijing, China (2007) WE303.
- [22] E. Kako, H. Hayano, S. Noguchi, T. Shishido, K. Watanabe, Y. Yamamoto, “High Power Input Couplers for the STF Baseline Cavity System at KEK” , Proc. of SRF2007, Beijing, China (2007) TUP60.
- [23] E. Kako, H. Hayano, S. Noguchi, T. Shishido, K. Umemori, Y. Yamamoto, K. Watanabe, H. Sakai, K. Shinoe, S. I. Moon, Q. J. Xu, “Vertical Test Results on the STF Baseline 9-cell Cavities at KEK” , Proc. of SRF2007, Beijing, China (2007) WEP10.
- [24] Y. Yamamoto, H. Hayano, E. Kako, S. Noguchi, T. Shishido, K. Umemori, H. Sakai, K. Shinoe, S. I. Moon, K. Watanabe, Q. J. Xu, “Cavity Diagnostic System for the Vertical Test of the Baseline SC Cavity in KEK-STF” , Proc. of SRF2007, Beijing, China (2007) WEP13.
- [25] K. Watanabe, S. Noguchi, E. Kako, T. Shishido, H. Hayano, “New HOM Coupler Design for ILC Superconducting Cavity” , Nucl. Instr. & Meth. in Phys. Research A 595 (2008) p299-31
- [26] 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) TUPP0007.
- [27] 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) TUPP0021.
- [28] 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) TUPP0040.
- [29] 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) TUPP0056.
- [30] 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) TUPP0086.
- [31] 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) THPP0085.
- [32] 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.

- [33] 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.

## B. 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。本年度はさらにそれらを集約するモジュール設計に着手した。

#### 1. はじめに

X 線は医療、生命科学、材料科学など広い分野で利用されている。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。昨年度は CW ビームシステムの概念設計の検討とともに、CW ビーム対応型高電界超伝導空洞試作機の性能測定ならびに入力結合器の設計、システムに不可欠な大電力高周波源開発を行った。そこで本年度はそれらの基本構成要素の開発を継続すると共に新たに高調波減衰器の設計を始め、さらにこれらを集約する CW 空洞モジュール設計に着手した。

#### 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。

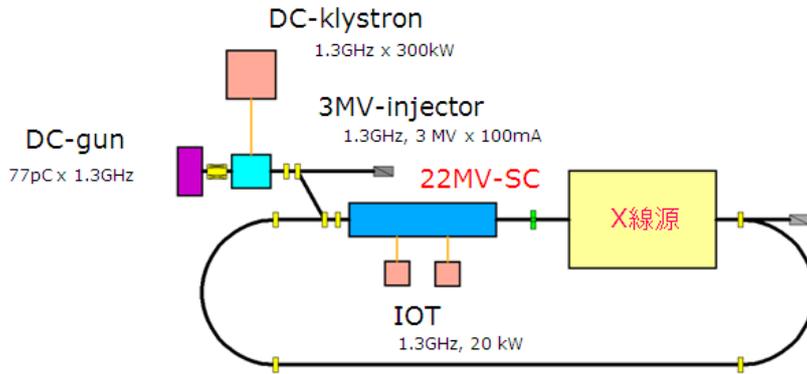


図 1 : 次世代小型高輝度光子ビーム源の CW 稼働概念図

### 3. 空洞開発

#### 3-1. 9 連型主空洞の開発

CW 型空洞として試作した 1.3GHz ニオブ空洞形状を図 2 に示す。高調波対策として大口径ビームパイプ及び EFB と命名された偏心型モード変換部を取付け、これまでにない 4 極モード対策を有する 9 連空洞になっている。この形状の問題はアイリス径を大きくしたことによる電場の集中とそれに伴う電子放出の影響であり、試作 9 連空洞のここまでの最高電場は 17MV/m である (図 3)。その原因究明のために電子放出などの現象を正確に把握しその場所を特定するための空洞診断技術の開発を積極的に進めてきた。

計測中の空洞外面に沿ってセンサー群を周回させる低温下での放射線観測 (図 4) は 8-9 セル間のアイリスでの電子放出を示唆した (図 5)。昇温後の内部観察で該当箇所に見られる小突起が発見され、電子の軌道シミュレーションはこの場所が電子放出源である可能性を示した。そのためこれを機械的に除去し、その効果を見るための低温測定を進めている。

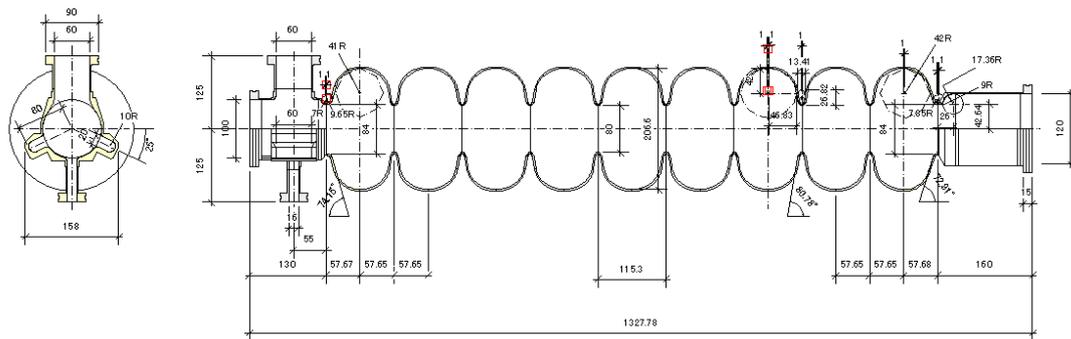


図 2 : CW 駆動型 9 セル超伝導加速空洞形状

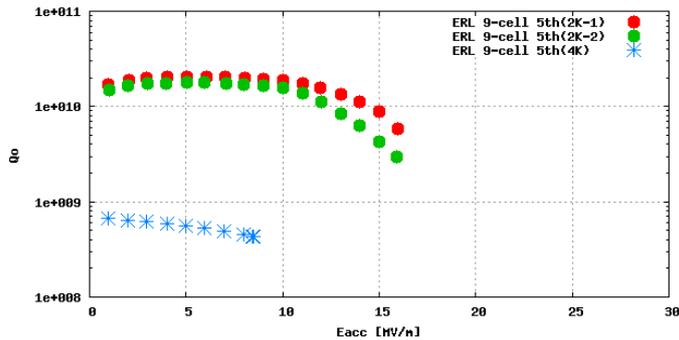


図3 9連試作空洞の性能測定結果

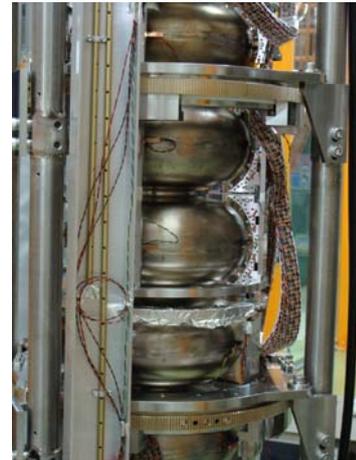


図4 空洞診断装置

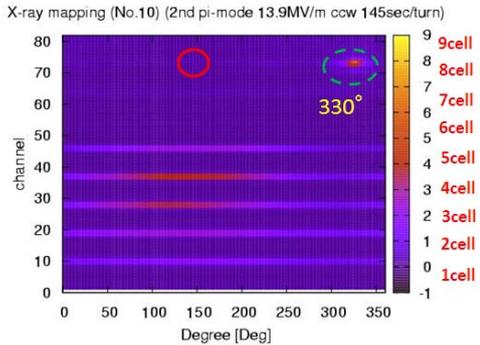


図5 9連空洞の放射線分布。横軸は回転角度。150度の○印位置に図6の突起が発見された。

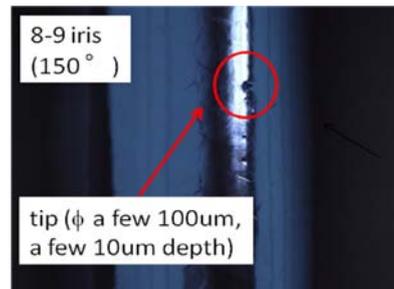


図6 8セルと9セルの間のアイリス溶接シーム脇に小突起が見つかった。

### 3-2. 入射空洞開発

入射空洞は加速電圧は低いがビームへ伝送する高周波電力が大きいので、2本の入力結合器を装備する2セル型超伝導空洞を採用する(図7)。これによって結合器1本当たりの負担を半減することが出来る。昨年度に試作したこの形式の空洞について、今年度は空洞単体での性能試験を実施し、40MV/m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。現在は入力結合器の電力試験を準備している。

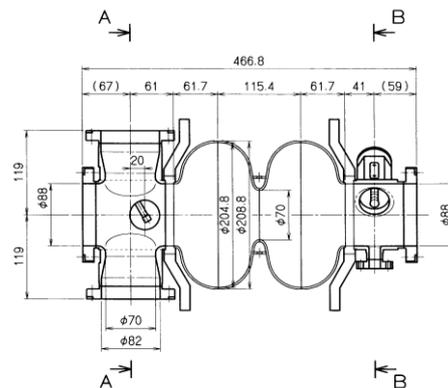


図7: CW型入射用2セル超伝導空洞形状

## 4. 周辺部品の開発

主空洞の重要な要素として、入力結合器、高調波減衰器、周波数チューナーなどがあり、それらの開発を行った。主空洞には20kW級

の CW 電力が全反射状態で供給されるため、結合度とともにセラミック窓やベローズの定在波に対する位置が冷却対策として重要な意味を持つ。試作部品を使って冷却条件などの試験を進めていたが、ある定在波条件下では 4kW でもセラミック窓が昇温・破損する事態が発生した。これは冷却対策として行った窓周辺の寸法変更により、セラミック部に 1.3GHz の共振モードが出現したために生じた発熱が原因であることが判明した。その対策としてセラミック厚みを 6.2mm から 5.4mm へ薄くした改良窓を製作し、その共振周波数を 30MHz 上昇させた。現在はその電力試験の準備を進めている。高調波減衰器には、広帯域の確保と CW ビームによる 150W 高調波電力を考慮した結果、フェライトを用いたビームライン型を採用することにした。フェライトは 70K に冷却され、2K 空洞への熱侵入を減らすためにクシ歯型の RF コンタクト付きベローズで熱絶縁される。このため 70K でのフェライトの減衰特性の計測を進めるとともにフェライトなしのベローズ構造を試作し、切削油や製作手順などフェライトを保護する製作手法の確立、両フランジ間の自由度計測、冷却方式の検証などの試験を続けている（図 8）。周波数チューナーには、粗調整用のスライドジャッキ、微調整用のピエゾ素子を併用した可動範囲が 600kHz 級の周波数チューナーを採用し、その設計と試作を進めている。

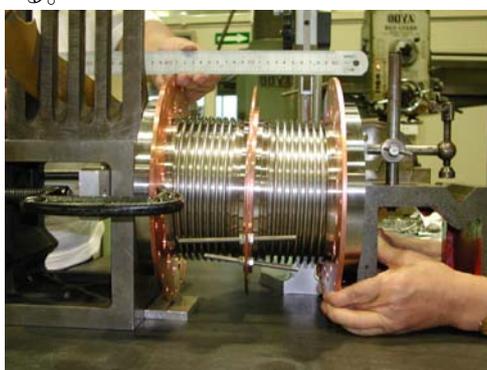


図 8 オフセットを計測中の試作ダンパー（フェライトなし）。

## 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の設計を進めている（図 9）。本年度はその基本設計を完成し、材料強度や板厚の設定およびそれに基づく空洞構造の機械強度、固有振動モードと補強の解析を行い、強度保証と高圧ガス保安法対応のための資料作成を行った。また構造設計に必要な情報として、チタンフランジやガスケットの組合せ、チューナー用ロードセルや高周波コネクタなどの極低温への適応性や熱伝導率の実験計測などを進めている。

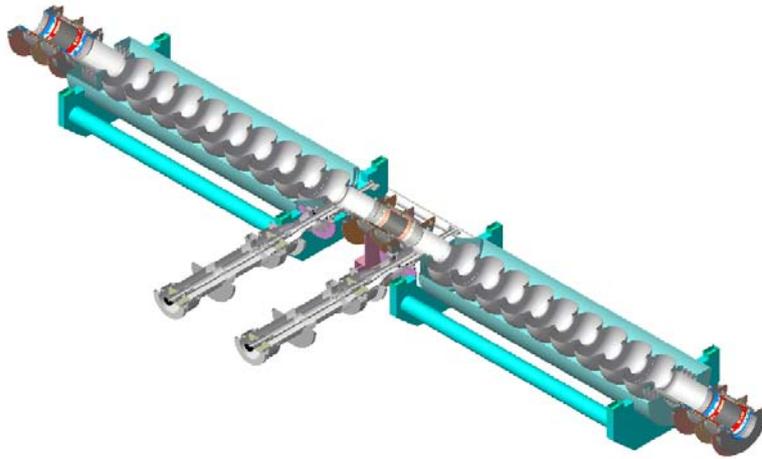


図9 CW ビームシステム主空洞モジュール

## 6. 300kW・CW 大電力マイクロ波源の完成と試験

平成 20 年度、クライストロンの要素部品の開発を行い、部品として①電子銃②入力及び中間空洞③出力空洞及び出力回路④コレクター⑤外部アクセサリ（集束コイルや架台）などが製作され、一部コールド試験での評価などを行った。引き続き平成 21 年度ではそれらの部品を合体し真空管としての完成（排気、ベーク、電圧エージングを含む）に到達した。この完成したクライストロンと平成 20 年度製造完了した 1.3GHz 帯の CW、150kW サークュレータを用いて総合的な評価試験を行った。本評価では、本来使用する大電力直流電源の製作スケジュール及び設置場所の問題から、次の段階に譲り、平成 21 年度は予備品として KEK にある仮電源で約 200kW のマイクロ波電力まで評価した。但し検収時の試験では、必要な仕様は全て満足し、又効率も 60%

表 1. クライストロン動作パラメータ

項目	設計値	動作値(270kW)	動作値(300kW)
動作周波数	1300MHz	1300MHz	1300MHz
ヒータ電圧	12V 以下	10.5V	10.5V
ヒータ電流	20A 以下	14.5A	14.5A
ビーム電圧	52kV 以下	48kV	49.5kV
ビーム電流	11A 以下	9.36A	9.75A
飽和出力電力	270kW 以上	278kW	305kW
飽和入力電力	40W 以下	34W	34W
ビームバービアンス	0.89 $\mu$ P	0.89 $\mu$ P	0.89 $\mu$ P
動作効率	50%以上	61.9%	63.2%
電力利得	38dB 以上	39.1dB	39.5dB

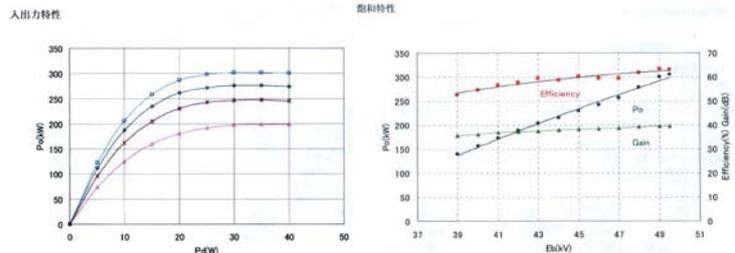


図 10 : 300kW クライストロンの仕様と試験結果（検収データ）



図 11 : 写真左は KEK で据付。手前にサーキュレータがある。写真右はクライストロンアセンブリ単体の写真。

以上という優秀な結果を確認した。図 10 にその時のデータを示す。

図 11 にクライストロンアセンブリ単体の写真と、KEK での評価試験のための据付時の写真を示した。ここでは直流高電圧 44kV を印加して大電力マイクロ波電力 150kW までの試験を行った。150kW 出力は仮電源での電圧による制限と、サーキュレータの仕様が 150kW であることから決めたものである。又その後位相測定その他必要なデータを全て取り終え、ひとまず 300kW 大電力クライストロンの開発は成功裏に終了した。今後は量子ビーム計画で必要な CW 超電導加速空洞の開発研究のマイクロ波源として開発に供される。

## 7. 次年度へ向けて

上記結果を踏まえて 22 年度では

- (1) 生産前 9 連空洞試作機の完成と性能確認試験の実施。
- (2) 主空洞モジュール用の本機部品の製作を開始する。
- (3) 周辺部品開発としては、フェライト付きダンパーの試作を進めており、次年度はそれを用いて 70K の低温試験を行う。また周波数チューナーについても、極低温下での動作試験を実施する。
- (4) CW クライストロンを使った高周波電力試験設備の整備。
- (5) 2 セル入射空洞用入力電力結合器の電力試験を推進する。

## 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、坂中章悟、高橋毅 (高エネルギー加速器研究機構)  
篠江憲治 (東大物性研)、沢村勝 (原科研)

## 発表文献等

- 1) H. Sakai, K. Umemori, S. Sakanaka, T. Takahashi, T. Furuya, A. Ishii, K. Shinoe, N. Nakamura, M. Sawamura, “Development of Input Power Coupler for ERL Main Linac in Japan”, Proc. of the SRF2009, Berlin, 2009.
- 2) M. Sawamura, T. Furuya, K. Umemori, H. Sakai, K. Shinoe, “ERL HOM Absorber Development”, Proc. of the SRF2009, Berlin, 2009.
- 3) M. Sawamura, T. Furuya, K. Umemori, H. Sakai, K. Shinoe, T. Takahashi, “Status of 9-cell Superconducting cavity development for ERL project in Japan”, Proc. of the SRF2009, Berlin, 2009.
- 4) K. Umemori, “Status of the Energy Recovery Linac Project in Japan”,
- 5) S. Fukuda, 他, “RF SOURCE OF COMPACT ERL (cERL) IN KEK”, 第 6 回日本加速器学会年会、日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所、2009 年 8 月 5 日-7 日.

## C. 電子ビーム・レーザー衝突技術の開発（システム統合化）

### 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検討を行っている。本年度はレーザー蓄積装置と高エネルギー加速器研究機構・先端加速器試験棟内に設置したマルチバンチ電子ビーム生成加速器 (LUCX) の改造を行い、レーザーコンプトン散乱 X 線生成の強度を  $2 \times 10^5$  photons/sec から  $10^8$  photons/sec 以上に増強できるように準備できた。2010 年度中に軟 X 線領域で応用実験に関する試験運転が可能になるようにマルチバンチ電子ビーム生成実験を行い、100 bunches/pulse から 300 bunches/pulse 運転まで電子ビーム強度を上げることが可能になった。

#### 1. はじめに

X 線は医療、生命科学、材料科学など広い分野で利用されている。特に高輝度高品質な X 線は先端的な計測などに利用され多大な成果をあげている。しかしながらこのような高輝度な X 線は現状、大型放射光施設から得ており利用が限られている。本プロジェクトではこのような高輝度 X 線ビームを小型な施設によって生成することを目標とする。実機では超伝導加速空洞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分野で指針となる重要なものである。

#### 2. マルチパルス X 線生成実証試験と改造

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) にて行った。以下の図 1 にその構成図、図 2 に衝突点付近のレイアウト図を示す。



図 1 : LUCX 加速器構成図

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

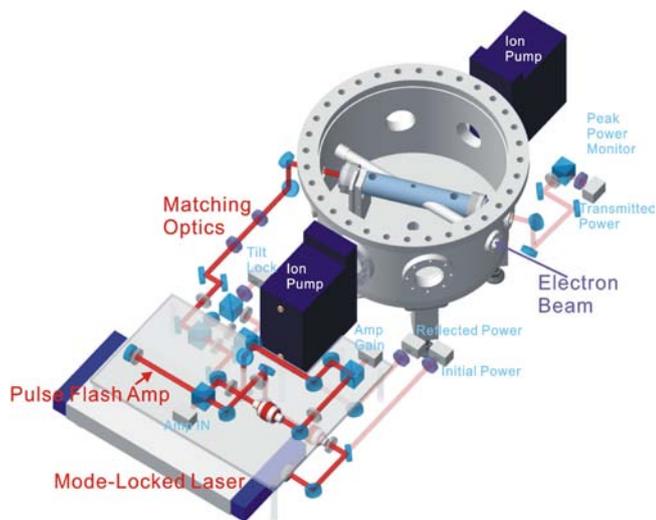


図 2 : 衝突点付近の構成図

まずマルチパルス X 線実証試験として以下の図 3 に示されるシンチレーション検出器を用いて測定を行った。シンチレータとしては厚さ 150  $\mu\text{m}$  の LYSO ( $\text{Lu}_{2(1-x)}\text{Y}_{2x}\text{SiO}_5:\text{Ce}$ ) を用いており、シンチレーション光を光電子増倍管によって増幅して検出した。このシンチレータの厚さは低エネルギーの光子を効率よく検出できるよう計算機シミュレーションによって最適化した。シンチレーション検出器の直前には鉛コリメータを設置し、生成 X 線の中心部分のみを切り出して検出する構成になっている。

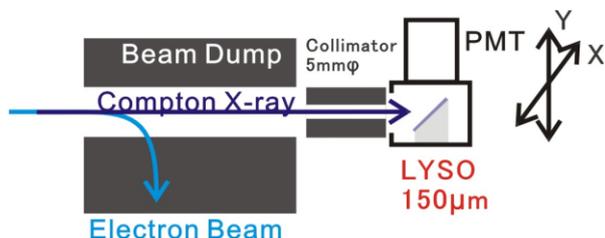


図 3 : シンチレーション検出器構成図

これによって検出された X 線の信号を以下の図 4・5 に示す。

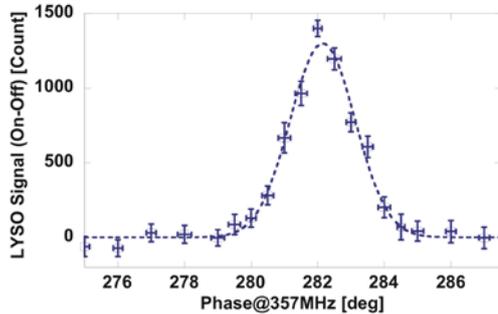


図 4：衝突タイミングプロット

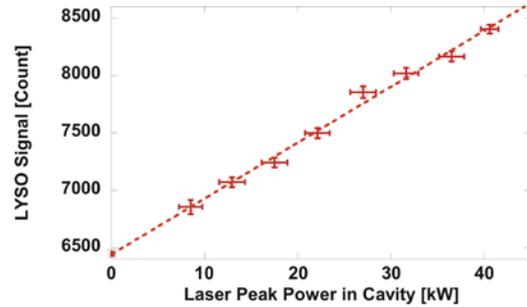


図 5：衝突レーザー強度依存プロット

図 4 のタイミングプロットは衝突レーザーのタイミングをスキャンした際のバックグラウンドを差し引いたプロットで、衝突が達成していないタイミングではゼロを示し、実際に衝突が達成されている際には最大約 1500Counts の信号が得られている。この時間幅はレーザーと電子ビームの時間幅に依存しており、約 7.5ps(rms) と予想通りの値が得られている。また、図 5 は実際に X 線の強度がレーザー強度に対して線形に変化していることを示している。これらの図 4・5 より実際にこの X 線がレーザーコンプトン散乱によって生成されたものであると確認できた。

以上の 2008 年度の実験結果から  $10^8$  photons/sec 以上の X 線強度を得るには、S-band 高周波源を 1 台から独立な 2 台システムに変更して、ビームエネルギー約 50MeV の 100 bunches/train (2nC/bunch) マルチバンチ電子ビーム生成を可能にする必要がある。図 6 は改造後の RF System を示す。図 7 は 2nC/bunch の Beam Loading を補正した場合の旧システムと改造後のシステムの計算結果である。

また、衝突点における電子ビームサイズを小さく（直径で  $30\mu\text{m}$  in sigma 以下）して、beam background を減らすために、RF Gun 電子源の直後に光電子励起用レーザーパルス入射のためのシケーンとコリメータが入られる装置改造を行うことにした。

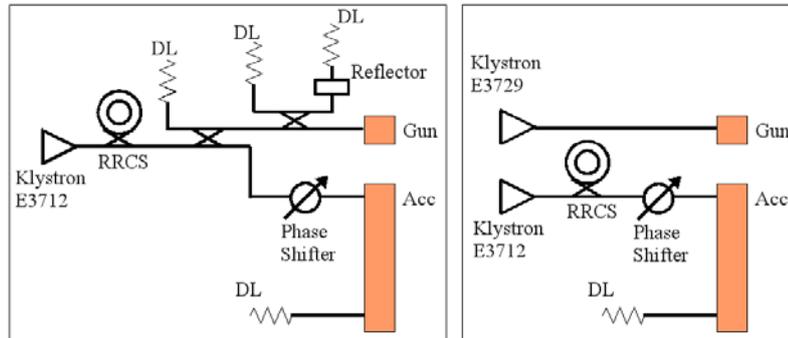


図 6 高周波電力系の改造、2010.10 完成予定。左が旧システム、右が改造後の RF システム。

さらにビーム試験に基づいた多くの知見から改造装置は図 8 に示されるものになった。2010 年 3 月に RF System を除いて、装置改造が完成したので、1 台の高周波源で運転を再開して 6 月までに放射線安全確認審査を受ける状況になった。電子ビームサイズで 16 倍、電子ビーム強度で 5 倍、レーザー強度で 20 倍にすることによって X 線強度が三桁上がるように要素技術開発を進めている。

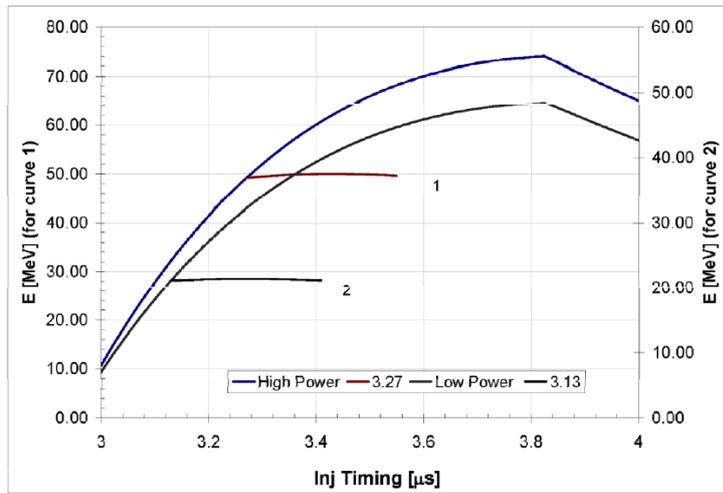
### 3. 新高周波電子源の設計・製作と性能測定結果

新高周波電子源空洞設計を行い、空洞製作を開始した。設計では無負荷 Q 値を 15%程度上げかつ 0-mode と  $\pi$ -mode の周波数差を 8.6MHz まで拡げることができた。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 10 $\mu$ C、5.6 $\mu$ sec、5.0MeV 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。

2009 年秋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 1/3 以下にできた。

また、簡単に 300 bunches/pulse 電子ビームも行えた。図 9 は新高周波電子源の写真と 300 bunches/pulse を beam dump まで輸送した時の 300 bunches のビームエネルギー測定結果である。高周波電子源空洞内の最高加速電界は 120MV/m 以上で安定に運転できた。

Beam Loading Compensation for 2nC/ bunch, 100 bunches



Curve 1 : with modified RF system      Curve 2 : with existing RF system

図 7 100 bunches/pulse (2nC/bunch) beam loading 補正、旧システムでは 23MeV までしか加速できない。改造後は 50MeV まで加速できる。

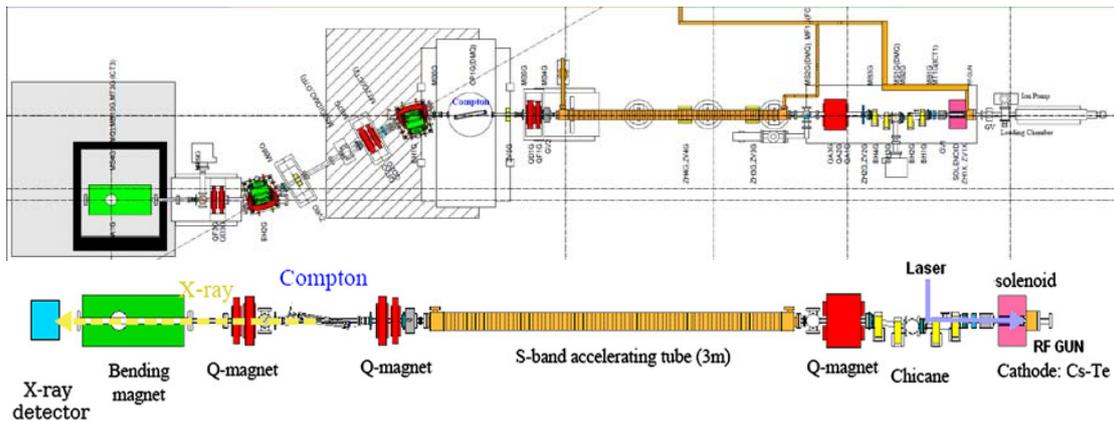


図 8 上が改造後の LUCX、下が旧 LUCX。

### 4. 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以下のような重要な知見が得られていた。図 10 はパルス毎に X 線を検出しつつ衝突タイミング依存の測定を行った結果である。Y 軸の Bunch Number は値が小さいほど前方のバンチを用いて生成した X 線であることを示している。図 10 から見て取れるようにバンチ毎に最適な衝突タイミングがシフト

していることがわかる。これはマルチバンチビーム加速の際のビームローディング補正が不十分であったためにバンチ間隔にずれが生じ、引き起こされた現象である。実機ではさらに長いトレインを用いるため、この効果はさらに顕著になり高精度のビームローディング補正が必須である。

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3000バンチ以上のマルチバンチ電子ビームとの衝突によるX線生成実験を行い、この高精度衝突技術の開発と蓄積を進める。2008年度の実験では、ビームサイズ、パルス長がそれぞれ30 $\mu\text{m}$ 、10psのレーザーパルスと60 $\mu\text{m}$ 、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 $\mu\text{m}$ 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10 $\mu\text{m}$ 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。さらに、光高周波電子源ビーム生成のシミュレーションにより大強度電子ビーム生成が20 $\mu\text{sec}$ パルス運転で可能であることを示したので、超伝導加速空洞製作技術が確立する前に、5MeV-10 $\mu\text{C}$ 電子ビームによる高輝度軟X線生成実証実験を進める。これにより、電子ビームとレーザーパルス衝突に関する技術を本番の実証実験前に確立することを目指す。同時に、高輝度軟X線の利用実証試験も行うことになる。

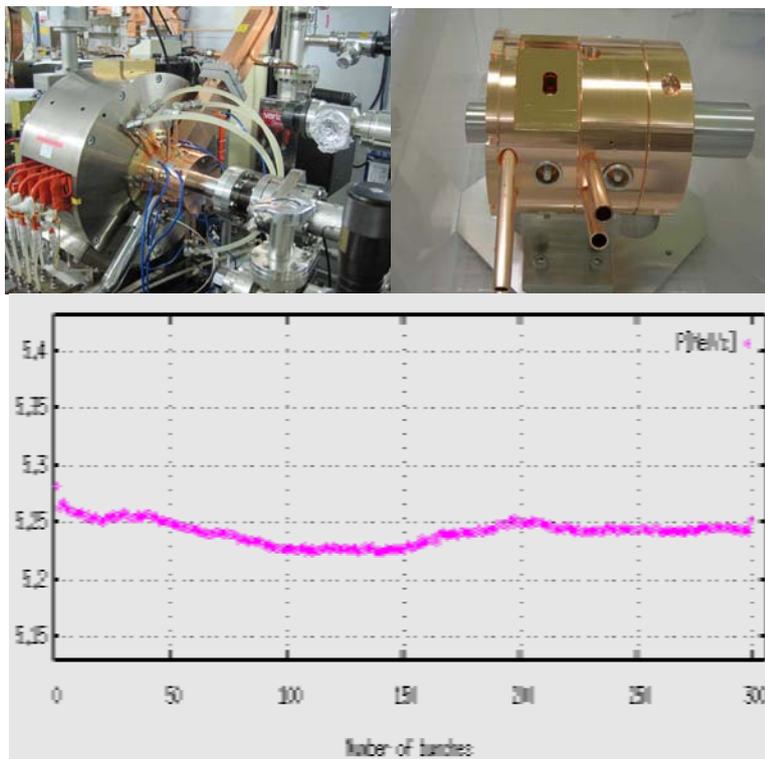


図9 新高周波電子源写真と300 bunchesのエネルギー測定結果、energy spread: 0.75%, bunch charge: 0.53nC, total charge: 160nC, beam energy: 5.25MeV.

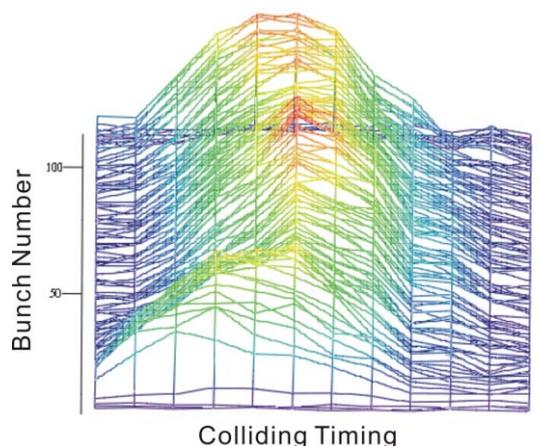


図10: パルス毎のタイミング依存

## 参考文献

- [1]. S. Kashiwagi, R. Kato, Y. Morio, K. Furuhashi, Y. Terasawa, N. Sugimoto, G. Isoyama, H. Hayano, H. Sugiyama, J. Urakawa, K. Watanabe, M. Kuriki, C. Shonaka and D. Kubo, "Development of a Photocathode RF Gun for an L-band Electron Linac", Proceedings of FEL2009 (Liverpool, UK), TUPC20, 2009
- [2]. Hiroataka Shimizu, Sakae Araki, Yoshisato Funahashi, Yosuke Honda, Toshiyuki Okugi, Tsunehiko Omori, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Masao Kuriki, Shuhei Miyoshi, Tohru Takahashi, Yasuaki Ushio, Tachishige Hirose, Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Pei Guoxi, Li XiaoPing, et.al. "Photon Generation by Laser-Compton Scattering Using an Optical Resonant Cavity at the KEK-ATF Electron Ring", Journal of Physical Society of Japan, Vol. 78, No.7, 074501-1 -- 074501-7 (2009)
- [3]. "Development of Hard X-ray Detector with GEM" by Shoji Uno (KEK) 1st International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors, 12-15 June 2009, Kolympari, Crete, Greece
- [4]. 「GEMを用いた硬X線検出器の開発」黒石将弘 (信州大学) 日本物理学会 2009年秋季大会 2009年9月10-13日 甲南大学
- [5]. "Development of New Type Gaseous Gamma Camera with GEM" by T.Koike (Tokyo University of Science), 2009 IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference, 23-31 October 2009, Orland, Florida, USA
- [6]. "Developments of SOI Monolithic Pixel Detectors", Y. Arai et al. Technology and Instrumentation in Particle Physics 2009 in Tsukuba, Japan, 11-17 March, 2009, Preprint submitted to TIPP09, to be published in NIM A
- [7]. "Silicon-on-insulator technology enables next-generation radiation image sensors", Yasuo Arai and Toshinobu Miyoshi, 5 August 2009, SPIE Newsroom. DOI: 10.1117/2.1200907.1725.
- [8]. "Development of SOI Pixel Process Technology", Y. Arai\* et al. 7th International "Hiroshima" Symposium on Development and Applications of Semiconductor Tracking Devices, International Conference Center Hiroshima, Japan, Aug. 29-Sep. 1, 2009, to be published in Nucl. Instr. and Meth. A.
- [9]. "Reduction techniques of the back gate effect in the SOI Pixel Detector", R. Ichimiya, Y. Arai, K. Fukuda, I. Kurachi, N. Kuriyama, M. Ohno, M. Okihara, for the SOI Pixel collaboration, Proceedings of Topical Workshop on Electronics for Particle Physics (TWEPP-09), 21-25 Sep. 2009, CERN-2009-006, pp. 68-71
- [10]. "New Techniques in SOI Pixel Detector", Y. Arai, 2009 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Orlando Florida, Oct. 25-31, 2009, Conference Record,
- [11]. "SOI pixel 検出器の TCAD による構造最適化 "一宮亮、ほか 2009年9月11日、日本物理学会秋季大会 (甲南大学)
- [12]. "SOI pixel 検出器におけるバックゲート効果の埋め込みPウェルによる抑制"、瀬賀智子ほか、2009年9月11日、日本物理学会秋季大会 (甲南大学)
- [13]. "CDS機能を備えた積分型SOI pixel 検出器の性能評価"、池本由希子ほか、2009年9月11日、日本物理学会秋季大会 (甲南大学)
- [14]. "SOI技術を用いた読出し一体型ピクセル検出器の開発 (TCADによる放射線損傷の研究)"、河内山真美ほか、2009年9月11日、日本物理学会秋季大会 (甲南大学) .

- [15]. "X線照射による SOI MOS トランジスタ特性への影響の研究"、小貫良行ほか、2009年9月11日、日本物理学会秋季大会（甲南大学）
- [16]. "SOI 技術を用いた ILC 衝突点ビームモニタ“ペアモニタ”の読み出し回路の開発’、佐藤優太郎ほか、2009年9月11日、日本物理学会秋季大会（甲南大学）
- [17]. "大面積化を目指した計数型 X 線 SOI イメージセンサー(CNTPIX3)"、三好敏喜ほか、2009年9月28日、日本物理学会秋季大会（熊本大学）
- [18]. "Observation of pulsed x-ray trains produced by laser-electron Compton scatterings" Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Yasuo Higashi, Yosuke Honda, Tsunehiko Omori, Takashi Taniguchi, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Noboru Sasao, Rev. Sci. Instrum., 80(12) (2009) 123304 1-7.
- [19]. "Improvement of an S-band RF gun with a Cs2Te photocathode for the KEK-ATF" N. Terunuma, A. Murata, M. Fukuda, K. Hirano, Y. Kamiya, T. Kii, M. Kuriki, R. Kuroda, H. Ohgaki, K. Sakaue, M. Takano, T. Takatomi, J. Urakawa, M. Washio, Y. Yamazaki, J. Yang, Nucl. Instrum. Meth. A613 (2010) 1-8.
- [20]. "Stabilization of a Non-Planar Optical Cavity using its Polarization Property" Yosuke Honda, Hirotaka Shimizu, Masafumi Fukuda, Tsunehiko Omori, Junji Urakawa, Kazuyuki Sakaue, Hiroshi Sakai, Noboru Sasao, Optics Communications, Vol. 282, (2009) 3108-3112.
- [21]. "Photon Generation by Laser-Compton Scattering Using an Optical Resonant Cavity at the KEK-ATF Electron Ring" Hirotaka Shimizu, Sakae Araki, Yoshisato Funahashi, Yosuke Honda, Toshiyuki Okugi, Tsunehiko Omori, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Masao Kuriki, Shuhei Miyoshi, Tohru Takahashi, Yasuaki Ushio, Tachishige, Hirose, Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Pei Guoxi, Li XiaoPing, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.78 No.7. (2009) 074501.
- [22]. "Design of a mode separated RF photo cathode gun" Abhay Deshpande, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Kazuyuki Sakaue, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Noboru Sasao, Masakazu Washio, Nucl. Instrum. Meth., A600, (2009) 361-366.
- [23]. "FEMTO-SECOND PROFILE MONITOR USING PULSED LASER STORAGE IN AN OPTICAL CAVITY" K. Sakaue, M. Washio, S. Araki, M. Fukuda, Y. Higashi, Y. Honda, T. Taniguchi, T. Terunuma, J. Urakawa, N. Sasao, Proceedings of Free Electron Laser Conference 2009, TUPC23 (2009)
- [24]. "3-Dimensional Beam Profile Monitor Based on a Pulse Storage in an Optical Cavity for Multi-bunch Electron Beam" K. Sakaue, M. Washio, N. Sasao, S. Araki, M. Fukuda, Y. Honda, Y. Higashi, T. Taniguchi, N. Terunuma, J. Urakawa, Proceedings of Particle Accelerator Conference 2009, WE3GRC04 (2009)
- [25]. "Development of laser pulse storage in an optical super-cavity for a compact X-ray source based on laser-Compton scattering" Kazuyuki Sakaue, Masakazu Washio, Sakae Araki, Masafumi Fukuda, Yasuo Higashi, Yosuke Honda, Hirotaka Shimizu, Takashi Taniguchi, Junji Urakawa, Noboru Sasao, International Conference on Ultra-short Electron and Photon Beams, (2009)
- [26]. 「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(7)」坂上和之, 荒木栄, 浦川順治, 笹尾登, 谷口敬, 照沼信浩, 東保男, 福田将史, 本田

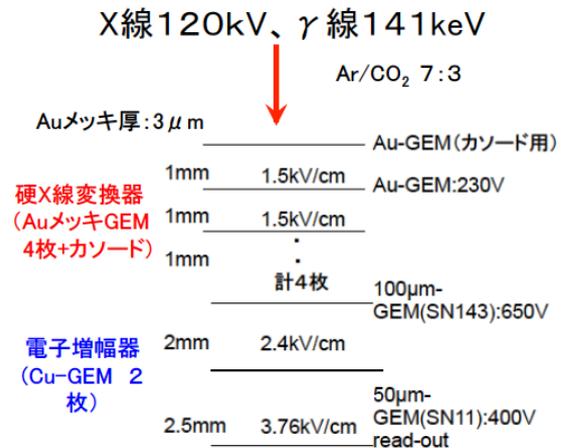
- 洋介, 武藤俊哉, 鷺尾方一, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009 年 3 月
- [27]. 「レーザー蓄積装置を用いたレーザーコンプトン散乱 X 線生成試験及び今後の展望」坂上和之, 荒木栄, 浦川順治, 谷口敬, 照沼信浩, 東保男, 福田将史, 本田洋介, 笹尾登, 鷺尾方一, 第 6 回加速器学会年会 2009 年 8 月
- [28]. 「KEK 小型電子加速器における RF 電子銃開発及びその利用研究」坂上和之, Abhay Deshpande, 荒木栄, Alexander Aryshev, 浦川順治, 笹尾登, 清水洋孝, 高富俊和, 照沼信浩, 福田将史, 本田洋介, 鷺尾方一, 第 7 回高輝度・高周波電子銃研究会, 2009 年 11 月

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

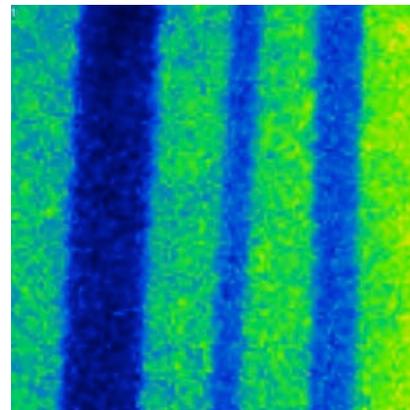
### 概要

量子ビームプロジェクトにより発生するX線のモニターばかりでなく今後のX線検出の分野でのブレイクスルーとなる高性能X線検出器の開発を目指す。2009年度は、昨年度の予備的評価で有望であったGEMを応用したガス検出器とSOIシリコンピクセル検出器についてさらに検討を深めた。

GEM型検出器はGEM(Gas Electron Multiplier)と呼ばれる多孔両面銅箔ポリイミドフィルムを使って放射線の電離信号をガス増幅するもので、2次元の位置情報を保持できるという画期的な特長を有する。さらにこのフィルムに金メッキを施すことにより、硬X線にも感度のある検出器を構成することができる。右図にその概念を示す。本年度は実際にこのような金メッキ加工のGEMの多層検出器を試作してその、有効性についての検討を行った。評価の一環として、管電圧125kVのX線発生装置を用いた透視イメージングを行った(下左図)。写真中央に置かれた20センチ厚のコンクリートブロックに埋め込まれた鉄筋が右下図に示すように明瞭に画像化できていることがわ

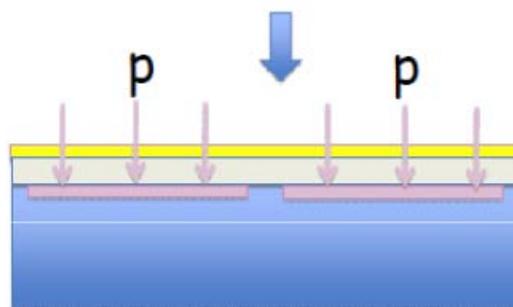


かる。今年度までに、原理実証としての評価はほぼ終了できたものと考えており、次年度より、大面積で高速処理が可能なシステムの構築に向けて開発を進める。

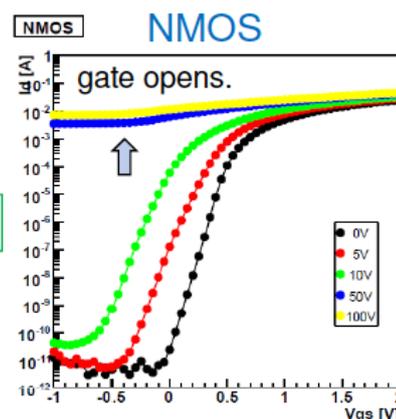


X線の微細イメージングの取り組みとしては引き続きSOI技術に基づくシリコンピクセル検出器の可能性の評価・検証に取り組んだ。SOIピクセルの実現にとって、潜在的な問題点はX線センサーとして機能する下側シリコン層を空乏化するために印可されるバイアス電圧が、上側回路層のデバイス(例えばFETなど)の動作に影響を与える可能性(バックゲート効果)である。

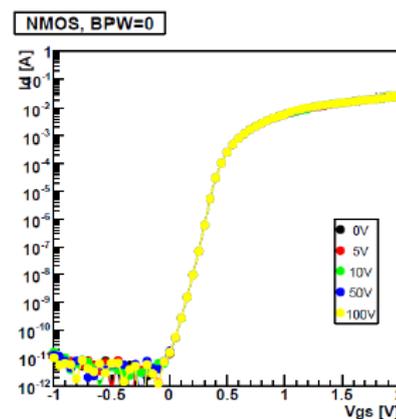
このバックゲート効果を抑制するための方策として今年度検討が進められたのが、埋め込みP型ウェル (Buried P Well: BPW) の導入である。これは左図に示すようにSOI基盤の上面から絶縁層下部を狙ってp型イオンを打ち込むことで導電性のレイヤーをそこに形成するものである。こうすることでこのレイヤーに任意の電位を外部から与えることが可能となり、下側シリコン層に与えられたバイアス電圧によるバックゲート効果を遮蔽できる。今年度は実際にBPWを打ち込んだテストチップを作成し、その  $I_d-V_{gs}$  特性をBPWのないものと比較してみた。右図上が、BPWのないFETの測定結果であり、下側シリコンのバイアス電圧が0V (黒点) では示された良好な閾値カーブが、電圧を上げていくに従って崩れていき、50V以上ではほとんどトランジスターとして動作しないことを示している。一方BPWを施しその電位を0Vに固定したチップでは (右下図) バイアス電圧の印可によるFETの閾値カーブへの影響が完全に抑制されていることが見て取れる。このようにしてSOIシリコン検出器において、十分高いバイアス電圧を印可しながら回路を正常動作できる見通しが立った。



w/o BPW



w/ BPW =0V



高いバイアス電圧の印可は検出層裏面まで到達する厚い空乏層の形成を意味するため、数keVの軟X線から数十keVの高エネルギーX線までより高い効率で検出できる可能性を拓いたことになり、その意義は極めて大きい。2009年11月にはKEK-PFのBL-14Aにおいて14keV単色X線を使った予備的なテストを行い、すでに良好な結果が得られている。

この成果を踏まえて、来年度以降このSOIピクセルによる高精細X線検出器の実用システム実現に向けさらに開発研究を続けていく予定である。

### 開発スタッフ

責任者 : 幅純二 (高エネルギー加速器研究機構)  
 担当者 : 宇野彰二、新井康夫、内田智久、三好敏喜、村上武、池本由希子 (以上 高エネルギー加速器研究機構)

### 参考文献

#### 2009年度中の発表および掲載

"Development of Hard X-ray Detector with GEM" by Shoji Uno (KEK)

1st International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors, 12-15 June 2009, Kolympari, Crete, Greece

1. 「GEM を用いた硬 X 線検出器の開発」黒石将弘 (信州大学)  
日本物理学会 2009 年秋季大会 2009 年 9 月 10-13 日 甲南大学
2. "Development of New Type Gaseous Gamma Camera with GEM" by T.Koike (Tokyo University of Science)  
2009 IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference, 23-31 October 2009, Orland, Florida, USA
3. "Developments of SOI Monolithic Pixel Detectors", Y. Arai et al.  
Technology and Instrumentation in Particle Physics 2009 in Tsukuba, Japan, 11-17 March, 2009, Preprint submitted to TIPP09, to be published in NIM A
4. "Silicon-on-insulator technology enables next-generation radiation image sensors", Yasuo Arai and Toshinobu Miyoshi, 5 August 2009, SPIE Newsroom. DOI: 10.1117/2.1200907.1725.
5. "Development of SOI Pixel Process Technology", Y. Arai\* et al.  
7th International "Hiroshima" Symposium on Development and Applications of Semiconductor Tracking Devices, International Conference Center Hiroshima, Japan, Aug. 29-Sep.1, 2009, to be published in Nucl. Instr. and Meth. A.
6. "Reduction techniques of the back gate effect in the SOI Pixel Detector", R. Ichimiya, Y.Arai, K. Fukuda, I. Kurachi, N. Kuriyama, M. Ohno, M. Okihara, for the SOI Pixel collaboration, Proceedings of Topical Workshop on Electronics for Particle Physics (TWEPP-09), 21-25 Sep. 2009, CERN-2009-006, pp. 68-71
7. "New Techniques in SOI Pixel Detector", Y. Arai, 2009 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Orlando Florida, Oct. 25-31, 2009, Conference Record,
8. "SOI pixel 検出器の TCAD による構造最適化 "一宮亮、ほか 2009 年 9 月 11 日、日本物理学会秋季大会 (甲南大学)
9. "SOI pixel 検出器におけるバックゲート効果の埋め込み P ウェルによる抑制"、瀬賀智子ほか、2009 年 9 月 11 日、日本物理学会秋季大会 (甲南大学)
10. "CDS 機能を備えた積分型 SOI pixel 検出器の性能評価"、池本由希子ほか、2009 年 9 月 11 日、日本物理学会秋季大会 (甲南大学)
11. "SOI 技術を用いた読出し一体型ピクセル検出器の開発 (TCAD による放射線損傷の研究)"、河内山真美ほか、2009 年 9 月 11 日、日本物理学会秋季大会 (甲南大学) .
12. "X 線照射による SOI MOS トランジスタ特性への影響の研究"、小貫良行ほか、2009 年 9 月 11 日、日本物理学会秋季大会 (甲南大学)
13. "SOI 技術を用いた ILC 衝突点ビームモニタ "ペアモニタ" の読み出し回路の開発'、佐藤優太郎ほか、2009 年 9 月 11 日、日本物理学会秋季大会 (甲南大学)
14. "大面積化を目指した計数型 X 線 SOI イメージセンサー(CNTPIX3)"、三好敏喜ほか、2009 年 9 月 28 日、日本物理学会秋季大会 (熊本大学)

## E. 小型高信頼性L-band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。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 年度に完成することを目指して開発する。その超伝導加速空洞に大電力マイクロ波を供給するシステムが必要であるが、本研究では小型 1.3GHz 高周波源の開発をテーマとしている。今までの国際リニアコライダーなどの 1.3GHz・超伝導加速器では大電力高周波源として、1本のクライストロンから 5MW や 10MW と言った大電力高周波を発生してそれを多くの空洞に分配するという方式を取っている。このシステムをとる背景としては、高周波源は電源、クライストロンを含めて高価なものであるので大きい電力のものを 1 台作り、それを分配したほうが結局コスト的に安くなるという考え方がある。一方で通常の利用では 1.3GHz 9セル超伝導空洞 1 台に必要な高周波電力は、超電導であるがゆえに空洞ロスは少なく、加速電界と加速電流の積だけで決まってしまう。例えば本研究の場合の小型高フラックス X 線源用加速器で空洞 1 台当たり 300kW 程度の電力で十分である。従ってそのような小さい電力の高周波源を開発するほうが従来の流れに比べて無駄が無いと言える。一方でそのようなものを空洞の台数だけ製作すると、この高周波源は小型でもコスト的には高くなる。従って本研究では、従来と異なった方式、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ある。

基本的な構成としては、モジュレーションアノード電極付きクライストロンというものでマイクロ波を発生させる。空洞 2 台に付き 1 台のクライストロンが使用される構成とする。パルス運転をする高周波は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部分でクライストロン内部の電流を変調させて発生される。このモジュレーションアノード電極は単にポテンシャルの変化を与えるだけであるから電力は食わない。電力は結局共通である直流高圧電源で供給される。パルス電力を取った時に生ずる電圧降下分をバウンサー回路などで保障するとコンデンサーバンクを小さく出来、又変調器も共通化すると小型化されたシステムが構築される。次の発生した電力を空洞まで分配するシステムであるが、これは 1.3GHz 帯の導波管で分配されるが本件の場合 2 空洞を考えているので、高性能の電力分配器が必要である。もしこの分配器が高い方向性を持ち、各空洞からの反射が別の空洞へ行くことがな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も応用することが可能で将来的な応用性が高い研究テーマであると思われる。

## 1. モジュレーションアノード付きクライストロンの開発

概略で述べたように本研究ではモジュレーションアノード付きクライストロンが必須である。2 空洞へ先頭パルス電力 750kW を供給するとして、60% ぐらいの高効率を仮定すると表 1 のような仕様が必要である。本年度はこの仕様を実現するためのクライストロンの設計から先ずはじめた。図 1 にシミュレーション結果の 1 例を示した。特に通常のアノードとカソード間の電位、モジュ

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

<b>Klystron</b>	
Frequency	1.3 GHz
Peak Power	750 kW
Average Power Output	7.50 kW
RF pulse width	2 ms
Repetition Rate	5 Hz
Efficiency	60 %
Saturated Gain	
Cathode voltage	62.7 kV
Cathode current	18.8 A
Perveance(Beam@62.5kV)	1.2 $\mu$ Perv
(Gun@53kV)	1.53 $\mu$ Perv
Life Time	110,000 hours
# in 3 cryomodule	6.5
Focusing	Permanent magnet focusing
Type of Klystron	Modulated Anode Type
<b>DC Power supply per 6 cryomodules</b>	
# 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
Repetition Rate	5 Hz
Voltage Sag	<1 %
<b>Bouncer Circuit</b>	
Capacitor	26 $\mu$ F
Capacitance	260 $\mu$ F
Inductance	4.9 mH
<b>M. Anode Modulator</b>	
Anode Voltage	53 kV
Anode Bias Voltage	-2 kV

レーションアノードとカソード間の電位の様子も図 1 に示してあるが、これは電子銃の設計に対して重要なものである。高周波のシミュレーションでも効率 60% を達成できる設計が実現したので、これをベースにしてモジュレーションアノード付きクライストロンの製作に取り掛かった。設計と製造の工程の時間的な制約のために平成 21 年度は本体の真空管化直前までの工程にとどめた。平成 22 年度に残りの工程、すなわち排気ベークを行い、その後チップオフして真空管化する。その後電圧及び高周波のエージング(プロセッシング)を行い完成となる。図 2 に現在製作中のモジュレーションアノード付きクライストロンの外観図を示す。

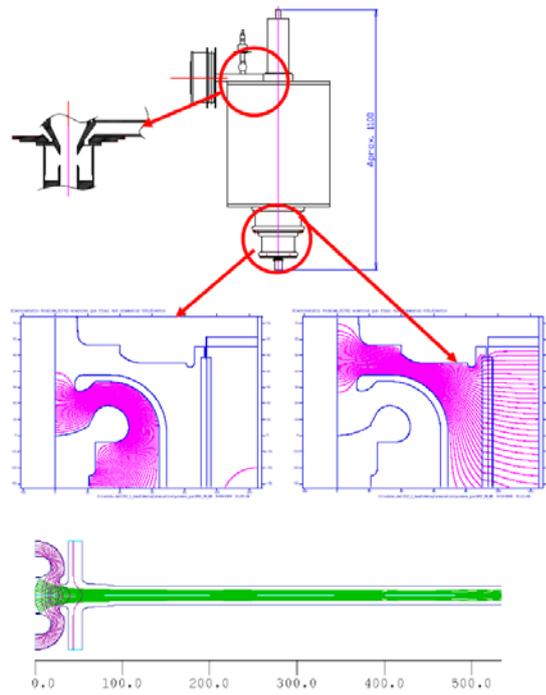


図1 モジュレーションアノード付きクライストロンのシミュレーション結果

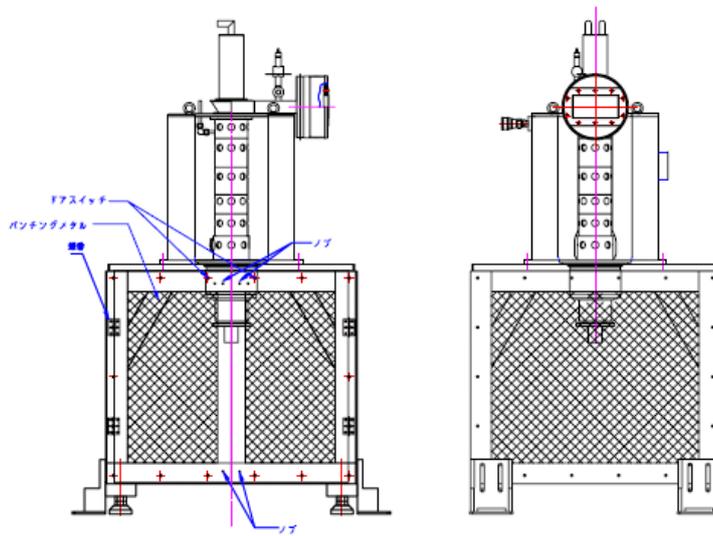


図2 クライストロンアセンブリの概観

## 2. 直流電源、及びモジュレーションアノード用モジュレータの開発

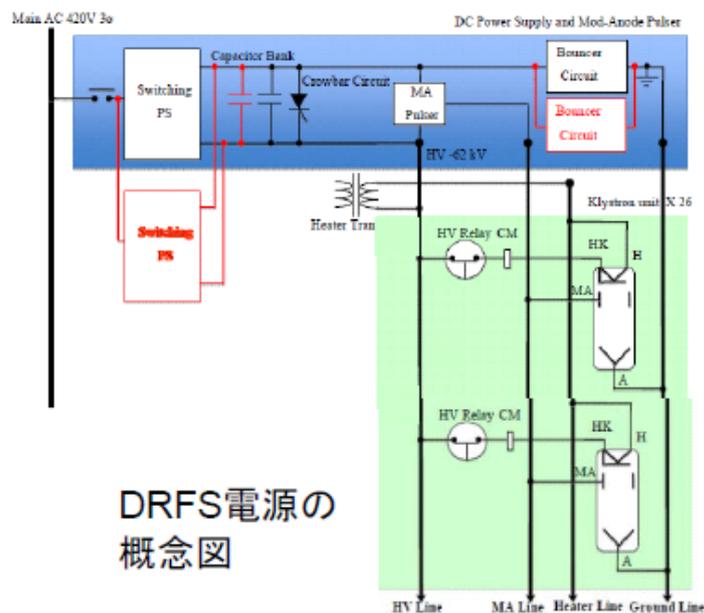


図3 分布型高周波源の概念図

モジュレーションアノード付きクライストロンへ電力を供給するシステムは概略で述べたように直流電源とモジュレーションアノード変調器からなる。また直流電源の構成要素として重要なものはスイッチング電源、コンデンサバンク、保護回路としてのクローバ回路（又は高速半導体SW遮断機）、バウンサー回路、及び複数負荷時に一方が故障した際に各負荷を切り離す高圧SWなどがある。又モジュレーションアノード用変調器の場合はパルス変調をかけるための高電圧半導体SWが重要な開発要素である。これらの電源に関するブロックダイアグラムを図3に示す。平成21年度ではこの部分のうち、モジュレーションアノード用変調器の製作、直流電源の構成部品の購入などを行った。直流電源の完成と総合運転は平成22年度を予定している。

## 3. 電力分配系の開発

電力分配系の概略は概要の所で示した。図4にその構成を示す。平成21年度では高い方向性を持つマジックティー型電力分配器の開発を行った。

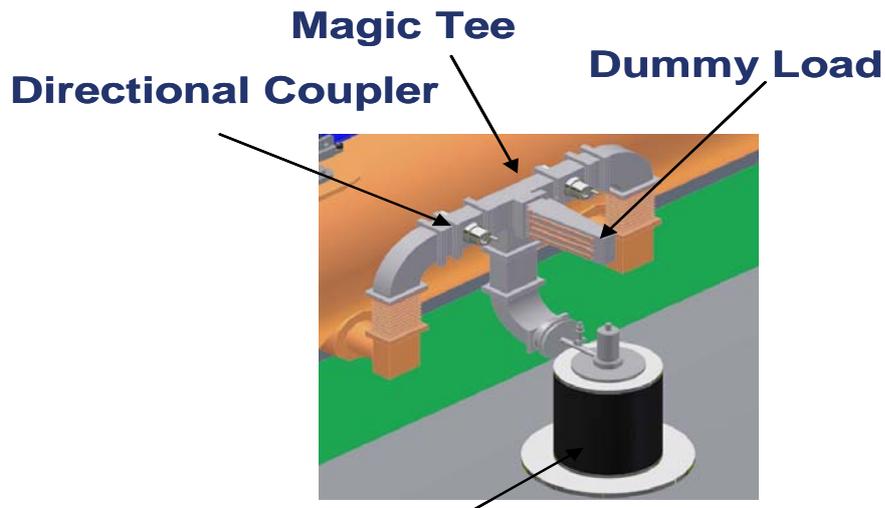


図4 分布型高周波源の高周波分配系

#### 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)

#### 参考文献

##### 2009 年度中の発表および掲載

- (1) S. Fukuda, "Proposal of RF New Scheme in ILC-Distributed RF System (DRFS), Proceeding of Particle Accelerator Society Meeting of Japan, JAEA, Tokai, Japan, August, p. 779, 2009.
- (2) S. Fukuda, "DRFS in SB2009", AAP Review, Oxford, January, 2010.
- (3) S. Fukuda, "DRFS Equioment", LCWS2010, Beijing, March, 2010.
- (4) S. Fukuda, "DRFS Development in HLRF", LCWS2010, Beijing, March, 2010.
- (5) S. Fukuda, "S1 Global RF Preparation", LCWS2010, Beijing, March, 2010.
- (6) M. Akemoto, "Power Supply for DRFS", LCWS2010, Beijing, March, 2010.
- (7) S. Michizono, "DRFS LLRF System Configuration", LCWS2010, Beijing, March, 2010.
- (8) S. Michizono, "S1 Global Study Plan", LCWS2010, Beijing, March, 2010.

## F. 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してきた。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した。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、新光蓄積装置で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ている。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、2010年度も基礎実験を行う。

本基盤技術開発研究では、実証試験装置を2011年秋までに完成させて、2012年夏までの高輝度X線生成実験によって性能を実証することになる。必要とする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、小型高輝度光子ビーム源開発室(KEK-2号館4階406号室)を作った。プロジェクトで得られた成果を発信するためのWebページを公開した。プロジェクトWebページ：<http://kocbeam.kek.jp/index.html>。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・調整に当たっている。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、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調整している。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年度から新しく福田グループが小型高周波源開発を行うことになった。2011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る。

## 2. 3. 成果の外部への発表

学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所(学会等名)	発表した時期	国内・外の別
Status of the Compton Experiment at the ATF (口頭)	高橋 徹	つくば市、エポカル (TILC09)	2009年4月18日	国内
招待講演、Development of CW Laser Wire in Storage Ring and Pulsed Laser Wire (口頭)	本田洋介	Vancouver, Hyatt Hotel (PAC09)	2009年5月6日	国外
Simulations of Mode Separated RF Photo Cathode Gun (ポスター)	Abhay Deshpande その他	Vancouver, Hyatt Hotel (PAC09)	2009年5月4日 ～7日	国外
Micron Size Laser-Wire System at the ATF Extraction Line, Recent Results and ATF-II Upgrade (ポスター)	Alexander Aryshev その他	Vancouver, Hyatt Hotel (PAC09)	2009年5月4日 ～7日	国外
Regional report ASIA (口頭)	早野仁司	Orsay, TTC Meeting, France	2009年6月16日 ～19日	国外
STF cryomodule tset (口頭)	加古永治	Orsay, TTC Meeting, France	2009年6月16日 ～19日	国外
Cavity and package production for KEK-STF (口頭)	野口修一	Orsay, TTC Meeting, France	2009年6月16日 ～19日	国外
Surface study by using sample plate (口頭)	佐伯学行	Orsay, TTC Meeting, France	2009年6月16日 ～19日	国外
KEK-STF cryomodule assembly report (口頭)	大内徳人	Orsay, TTC Meeting, France	2009年6月16日 ～19日	国外
STF cryomodule test plan (口頭)	大内徳人	Orsay, TTC Meeting, France	2009年6月16日 ～19日	国外
STF T-mao results (口頭)	山本康史	Orsay, TTC Meeting, France	2009年6月16日 ～19日	国外
Recent inspection results by Kyoto-camera (口頭)	渡邊謙	Orsay, TTC Meeting, France	2009年6月16日 ～19日	国外

STF new-EP commissioning (口頭)	上野健治	Orsay, TTC Meeting, France	2009年6月16日～19日	国外
4 Mirror Cavity R&D in Japan (口頭)	高橋 徹	Lyon, IPNL (PoiPol2009)	2009年6月23日～26日	国外
レーザー蓄積装置を用いたレーザーコンプトン散乱 X 線生成試験及び今後の展望 (ポスター)	坂上和之 その他	日本原子力研究開発機構(第6回日本加速器学会)	2009年8月5日～7日	国内
KEK-ATF ダンピングリングにおける Laser-Wire システムによる Beam Size 及び Emittance 測定とその改良 (ポスター)	清水洋孝 その他	日本原子力研究開発機構(第6回日本加速器学会)	2009年8月5日～7日	国内
周回発振型光蓄積装置によるレーザーコンプトン光源用レーザー標的の提案 (ポスター)	本田洋介 その他	日本原子力研究開発機構(第6回日本加速器学会)	2009年8月5日～7日	国内
KEK-ATF における ILC 偏極陽電子源の為に光蓄積共振器を用いた高輝度ガンマ線生成実験 II (ポスター)	赤木智哉 その他	日本原子力研究開発機構(第6回日本加速器学会)	2009年8月5日～7日	国内
Lバンドフォトカソード RF 電子銃の開発 (II) (ポスター)	柏木 茂 その他	日本原子力研究開発機構(第6回日本加速器学会)	2009年8月5日～7日	国内
S-BAND COMPACT X-RAY SOURCE WITH Pi/2 MODE ELECTRON LINAC (ポスター)	Abhay Deshpande その他	日本原子力研究開発機構(第6回日本加速器学会)	2009年8月5日～7日	国内
KEK 小型電子加速器 (LUCX) の将来計画 (ポスター)	福田将史 その他	日本原子力研究開発機構(第6回日本加速器学会)	2009年8月5日～7日	国内
招待講演 Development for Compact X-ray Source based on Compton Scattering using 1.3GHz Superconducting RF Accelerating Linac and New Laser Storage Cavity (口頭)	浦川順治	西安(ICFA Workshop on Ultra-Short electron/photon beams)	2009年9月7日～10日	国外

Development of a laser pulse storage technique in an optical super-cavity for a compact X-ray source based on laser-Compton scattering (ポスター)	坂上和之 その他	西安(ICFA Workshop on Ultra-Short electron/photon beams)	2009年9月7日～10日	国外
Upgrade of the accelerator for the Laser Undulator Compact X-ray source (LUCX) (ポスター)	福田将史 その他	西安(ICFA Workshop on Ultra-Short electron/photon beams)	2009年9月7日～10日	国外
高輝度偏極光子源の為の新型レーザー蓄積共振器の開発 I (口頭)	三好修平 その他	甲南大学(日本物理学)	2009年9月10日～13日	国内
高輝度偏極光子源の為の新型レーザー蓄積共振器の開発 II (口頭)	永田修司 その他	甲南大学(日本物理学)	2009年9月10日～13日	国内
KEK 小型電子加速器におけるレーザー蓄積装置を用いた小型 X 線源 (LUCX) の開発 (8) (口頭)	福田将史 その他	岡山大学(日本物理学会)	2010年3月20日～23日	国内
高輝度偏極光源の為の4枚鏡光蓄積共振器の開発 (口頭)	赤木智哉 その他	岡山大学(日本物理学会)	2010年3月20日～23日	国内
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(口頭)	浦川順治	茨城大学(日本原子力学会年会、企画セッション)	2010年3月26日～28日	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文 (発表題目)	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
Photon Generation by Laser-Compton Scattering Using an Optical Resonant Cavity at the KEK-ATF Electron Ring	Hiroataka Shimizu, et al.	Journal of the Physical Society of Japan	2009年4月掲載	国外
Stabilization of a non-planar optical cavity using its polarization property	Y. Honda, et al.	Optics Communications	2009年5月掲載	国外

Experimental result of Lorentz detuning in STF phase-1 at KEK-STF	Y. Yamamoto, et al.	Proc. of SRF2009	2009年7月掲載	国外
Cryomodule tests of the STF phase-1 at KEK	E. Kako, et al.	Proc. of SRF2009	2009年7月掲載	国外
R&D of nondestructive inspection systems for SRF cavities	Y. Iwashita, et al.	Proc. of SRF2009	2009年7月掲載	国外
Surface characterization of niobium samples electropolished together with real cavities	X. Zhao, et al.	Proc. of SRF2009	2009年7月掲載	国外
R&D for the post-EP process of superconducting RF cavity	T. Saeki, et al.	Proc. of SRF2009	2009年7月掲載	国外
Advances and performance of input couplers at KEK	E. Kako, et al.	Proc. of SRF2009	2009年7月掲載	国外
Silicon-on-insulator technology enables next-generation radiation image sensors	Y. Arai, et al.	SPIE Newsroom. DOI: 10.1117/2.1200907.1725.	2009年8月掲載	国外
New Techniques in SOI Pixel Detector	Y. Arai, et al.	IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference	2009年10月掲載	国外
Development of Compact Coherent EUV Source Based on Laser Compton Scattering	S. Kashiwagi, et al.	Radiation Physics and Chemistry	2009年11月掲載	国外
Observation of pulsed x-ray trains produced by laser-electron Compton scatterings	K. Sakaue, et al.	Rev. Sci. Instrum., <b>80</b> (12) (2009) 123304-1-7.	2009年12月掲載	国外
Improvement of an S-band RF gun with a Cs <sub>2</sub> Te photocathode for the KEK-ATF	N. Terunuma, et al.	Nucl. Instrum. Meth.	2010年2月掲載	国外

## 2. 4. 活動（運営委員会等の活動等）

### 運営委員会等の活動

2010年02月25日 文部科学省「量子ビーム基盤技術開発プログラム」シンポジウム,  
コンファレンススクエア エムプラス（東京）

### 技術検討会等 74 回

2009.08.26	第二回 X線検出検討会	KEK3 号館 425 号室
2009.12.14	第三回 X線検出検討会	KEK3 号館 425 号室
2009.07.21	空洞製作についての打ち合わせその一、KEK-STF 棟	
2009.07.22	空洞製作についての打ち合わせその二、KEK 二号館 406 号室	
2010.01.27	超伝導加速モジュールのコンセンサス打合せ	KEK2 号館 406 号室
2009.06.16-17	4 鏡共振器開発キックオフミーティング	広島大学
2010.03.02	4 鏡共振器引き継ぎミーティング	KEK-LC コンテナ

### 定例レーザー蓄積技術打ち合わせ

2009.09.15	量子ビームレーザー打ち合わせ	KEK 2 号館 406 室
2009.10.15	量子ビームレーザー打ち合わせ	広島大学
2009.12.11	量子ビームレーザー打ち合わせ	KEK 2 号館 406 室
2010.01.15	量子ビームレーザー打ち合わせ	広島大学

### 定例 LUCX Meeting

2009.04.02	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.04.09	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.04.16	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.04.23	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.04.30	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.05.14	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.05.21	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.05.28	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.06.04	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.06.11	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.06.18	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.06.25	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.07.02	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.07.09	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.07.17	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.07.23	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.07.30	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.08.13	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.08.27	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.09.03	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.09.17	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.09.24	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.10.01	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.10.08	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.10.22	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.10.29	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.11.05	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ
2009.11.12	小型 X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting)	KEK-LC コンテナ

2009. 11. 19 小型X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting) KEK-LC コンテナ  
 2009. 11. 26 小型X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting) KEK-LC コンテナ  
 2009. 12. 03 小型X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting) KEK-LC コンテナ  
 2009. 12. 10 小型X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting) KEK-LC コンテナ  
 2009. 12. 17 小型X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting) KEK-LC コンテナ  
 2010. 01. 07 小型X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting) KEK-LC コンテナ  
 2010. 01. 14 小型X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting) KEK-LC コンテナ  
 2010. 01. 21 小型X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting) KEK-LC コンテナ  
 2010. 01. 28 小型X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting) KEK-LC コンテナ  
 2010. 02. 04 小型X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting) KEK-LC コンテナ  
 2010. 02. 18 小型X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting) KEK-LC コンテナ  
 2010. 03. 04 小型X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting) KEK-LC コンテナ  
 2010. 03. 18 小型X線源実験打ち合わせ (LUCX meeting) KEK-LC コンテナ  
 2010. 03. 25 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

日時	会議名	場所
2009. 04. 27	第 12 回量子ビーム電子銃打ち合わせ	KEK2 号館 406 室
2009. 05. 25	第 13 回量子ビーム電子銃打ち合わせ	KEK2 号館 406 室
2009. 06. 29	第 14 回量子ビーム電子銃打ち合わせ	KEK2 号館 406 室
2009. 08. 05	第 15 回量子ビーム電子銃打ち合わせ	原子力科学研究所
2009. 09. 04	第 16 回量子ビーム電子銃打ち合わせ	KEK2 号館 406 室
2009. 10. 05	第 17 回量子ビーム電子銃打ち合わせ	KEK2 号館 406 室
2009. 11. 05	第 18 回量子ビーム電子銃打ち合わせ	KEK2 号館 406 室
2009. 12. 29	第 19 回量子ビーム電子銃打ち合わせ	KEK PF二階会議室
2010. 02. 08	第 20 回量子ビーム電子銃打ち合わせ	KEK2 号館 406 室
2010. 03. 15	第 21 回量子ビーム電子銃打ち合わせ	KEK2 号館 406 室

### 定例 L-band RF 電子銃開発グループ会合

日時	会議名	場所
2009. 04. 24	第 9 回 L-Band RF Gun 開発 G 打ち合わせ	KEK2 号館 406 室
2009. 06. 01	第 10 回 L-Band RF Gun 開発 G 打ち合わせ	KEK2 号館 406 室
2009. 07. 06	第 11 回 L-Band RF Gun 開発 G 打ち合わせ	KEK2 号館 406 室
2009. 08. 03	第 12 回 L-Band RF Gun 開発 G 打ち合わせ	KEK2 号館 406 室
2009. 09. 04	第 13 回 L-Band RF Gun 開発 G 打ち合わせ	KEK2 号館 406 室
2009. 10. 13	第 14 回 L-Band RF Gun 開発 G 打ち合わせ	KEK2 号館 406 室
2009. 11. 10	第 15 回 L-Band RF Gun 開発 G 打ち合わせ	KEK2 号館 406 室
2009. 12. 15	第 16 回 L-Band RF Gun 開発 G 打ち合わせ	KEK2 号館 406 室
2010. 01. 27	第 17 回 L-Band RF Gun 開発 G 打ち合わせ	KEK2 号館 406 室
2010. 03. 03	第 18 回 L-Band RF Gun 開発 G 打ち合わせ	KEK2 号館 406 室

## 2. 5. 実施体制

別表1 平成21年度における実施体制

業務項目	担当機関等	研究担当者
A パルス超伝導加速空洞技術の開発	加速器研究施設教授	○早野 仁司 (野口修一、加古永治、佐伯学行、山本康史、渡邊謙、宍戸寿郎、佐藤昌史、大内徳人、上野健治(高エネルギー加速器研究機構))
B CW超伝導加速空洞技術の開発	加速器研究施設教授	○古屋 貴章 (梅森健成、阪井寛志、坂中章悟、高橋毅(高エネルギー加速器研究機構)、篠江憲治(東大物性研)、沢村勝(原科研))
C 電子ビーム・レーザー衝突技術の開発(システム統合化)	加速器研究施設准教授	○照沼 信浩 (浦川順治、福田将史、本田洋介、Abhay Deshpande、Alexander Aryshev、荒木栄、清水洋孝、坂上和之(早稲田大学)、高橋徹、三好修平、永田修二、赤木智哉(広島大学))
D X線検出装置の実用化開発	素粒子原子核研究所教授	○幅 淳二 (宇野彰二、新井康夫、内田智久、三好敏喜、村上武、池本由希子(高エネルギー加速器研究機構))
E 小型高信頼性 L-band 高周波源開発	加速器研究施設教授	○福田 茂樹 (道園真一郎、明本光生、中島啓光、吉田光宏、松下英樹(高エネルギー加速器研究機構))
F プロジェクトの総合的推進	加速器研究施設教授	◎浦川 順治

注1. ◎:業務主任者、○:実施責任者(業務計画書のⅡ.2章の2.業務項目別実施区分の業務項目と担当責任者に対応)

注2. 本業務に携わっている方(参加者リストに記載されている方)を、全て記入。