

「小型加速器による小型高輝度 X 線源と
イメージング基盤技術開発」

平成 25 年度委託業務成果報告書

平成 26 年 5 月

代表者 浦川 順治
(高エネルギー加速器研究機構・特別教授)

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実施した平成 25 年度「小型加速器による小型高輝度 X 線源とイメージング基盤技術開発」の成果を取りまとめたものです。

目 次

| | |
|--|----|
| 1. 委託事業の目的 | 1 |
| 2. 平成 25 年度（報告年度）の実施内容 | 2 |
| 2.1 実施計画 | 2 |
| ① X 線生成性能向上のための技術開発および各要素技術の開発支援 | 2 |
| ② 超伝導高周波加速空洞運転技術の確立 | 2 |
| ③ 光高周波電子銃用新マルチアルカリ光カソードおよびレーザー蓄積装置の フィードバック技術開発 | 2 |
| ④ スポーク型超伝導空洞の開発 | 3 |
| ⑤ 小型高輝度 X 線源を用いた X 線イメージング装置の基盤技術開発 | 3 |
| ⑥ クライオ光陰極高周波電子銃開発 | 3 |
| ⑦ 大強度高繰返しレーザー開発援 | 4 |
| ⑧ 小型加速器を用いた逆コンプトン散乱光源による最適なイメージング手法の開発 | 4 |
| ⑨ スポーク型超伝導空洞開発に於ける設計及び非破壊検査 | 4 |
| ⑩ 小型高輝度 X 線発生装置を用いた X 線位相イメージング法の開発 | 4 |
| ⑪ プロジェクトの総合的推進 | 5 |
| 2.2 実施内容（成果） | 6 |
| ① X 線生成性能向上のための技術開発および各要素技術の開発支援 | 6 |
| ② 超伝導高周波加速空洞運転技術の確立 | 11 |
| ③ 光高周波電子銃用新マルチアルカリ光カソードおよびレーザー蓄積装置の フィードバック技術開発 | 13 |
| ④ スポーク型超伝導空洞の開発 | 23 |
| ⑤ 小型高輝度 X 線源を用いた X 線イメージング装置の基盤技術開発 | 33 |
| ⑥ クライオ光陰極高周波電子銃開発 | 40 |
| ⑦ 大強度高繰返しレーザー開発援 | 50 |
| ⑧ 小型加速器を用いた逆コンプトン散乱光源による最適なイメージング手法の開発 | 55 |
| ⑨ スポーク型超伝導空洞開発に於ける設計及び非破壊検査 | 62 |
| ⑩ 小型高輝度 X 線発生装置を用いた X 線位相イメージング法の開発 | 74 |
| ⑪ プロジェクトの総合的推進 | 79 |
| 2.3 成果の外部への発表 | 81 |
| 2.4 活動（運営委員会等の活動等） | 89 |
| 2.5 実施体制 | 90 |

1. 委託業務の目的

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・治療への利用を画期的に飛躍させる数 keV から 100 keV の X 線領域の小型高輝度 X 線発生装置の基盤技術開発を行う。小型の高輝度 X 線源は企業・病院・大学等での創薬および医療診断・治療に革新的な高効率化を提供する。装置の主な目標性能として、Peak Brightness : 10^{19} (photons/sec/mm²/mrad²/0.1%BW)、装置フットプリント : 6 m × 8 m、消費電力 : 100 kW 程度を想定している。

逆コンプトン散乱 (ICS) による X 線生成では、レーザーパルスと電子ビームの衝突を高繰返しミクロンサイズ精度で行うことによって高輝度 X 線生成が実現する。ブレークスルーは再利用のコンセプトによりレーザーパルス蓄積 1 MW と電子ビームパワー 1 MW の安定高繰返し衝突を 100kW 程度の電力で実現することである。超伝導加速器技術を使ったエネルギー回収型線形加速器とレーザーパルス蓄積衝突技術を融合することで Peak Brightness 10^{19} (photons/sec/mm²/mrad²/0.1% BW) を実現できる見通しを得た。

ICS X 線の特徴である準単色コーンビームの画期的な利用展開に繋がる小型高輝度 X 線源に必要な基盤技術開発を行い、実用化を図る。本委託研究にて実施する技術開発項目はマルチアルカリカソード、クライオ光陰極高周波電子銃、エネルギー回収型超伝導高周波加速器、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、レーザー光路精密調整及び X 線イメージング法である。

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (以下、KEK という。) では、超伝導線形加速器、小型高輝度光子ビーム源装置および先端 X 線イメージング法に関するシステム統合化研究開発を実施する。

代表機関 (KEK) は、参画機関 (国立大学法人広島大学、独立行政法人日本原子力研究開発機構 (JAEA)、学校法人日本大学、株式会社リガク、学校法人早稲田大学、独立行政法人産業技術総合研究所、国立大学法人京都大学、国立大学法人東北大学) と再委託契約を結び、本委託事業で実施する基盤技術開発およびシステム統合化研究開発を参画機関と密接に連携協力することによって推進する。

2. 平成 25 年度（報告年度）の実施内容

2.1 実施計画

① X 線生成性能向上のための技術開発および各要素技術の開発支援

既存のレーザー蓄積共振器を含む小型常伝導線形加速器（LUCX）の X 線生成性能を上げ、X 線検出器開発や X 線イメージング手法開発の為の実験を行う。現状 10 keV から 20 keV X 線領域で毎秒 10^6 光子数生成程度であるが、平成 25 年度中に X 線発生光子数を 10^8 程度まで上げる。その為に電子ビームパルス幅を拡げ 1000 bunches/pulse 加速運転を可能にする。また、レーザー蓄積パワーが ICS 時 100 kW から 300 kW まで増強すると同時に、衝突点での両ビームを $30\ \mu\text{m}$ (σ) 以下にする。学校法人日本大学が開発するクライオ高周波電子銃の設計・プロトタイプ製作に協力する。また、学校法人早稲田大学がファイバーレーザー増幅技術を使った 50 W レベルの 357 MHz モードロックレーザー発生装置製作を開始するので、レーザー発振器やクリーンルームを提供して協力する。そして、ファイバーレーザー増幅技術を使った 50 W の 357 MHz モードロックレーザー発生装置製作及びその装置と新光共振器を使った 300 kW 蓄積実験を行い、蓄積安定度等のデータを取得する。

国立大学法人広島大学と協力してレーザーパルス蓄積共振器のフィードバック性能を上げる実験を行い、増大率 5000 倍以上を目指す。また、 10^7 から 10^8 photons/sec の X 線フラックスを使ったイメージング取得実験により、X 線検出器および X 線イメージング法の最適化の知見を得る。その結果を分析することによって、X 線検出器開発や X 線イメージング手法開発の為の最適な X 線測定系の詳細設計を進める。

② 超伝導高周波加速空洞運転技術の確立

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器の運転性能を上げる為に、加速勾配の限界の原因を各種の表面処理法の適用・空洞内面検査などにより追及する。パルス 30 MV/m 超伝導高周波加速空洞運転技術および連続波 15 MV/m 超伝導高周波加速空洞運転技術を確立する。

③ 光高周波電子銃用新マルチアルカリ光カソードおよびレーザー蓄積装置のフィードバック技術開発（再委託先：国立大学法人広島大学）

従来の Cs_2Te カソードから可視光励起できる物性的に有望であるマルチアルカリの高量子効率カソードについて、数 % の量子効率や数ヶ月以上への寿命の改善に必要な条件を系統的に調べる。マルチアルカリカソード成膜試験装置により、蒸着条件の最適化を行い、平行して加速器への実装に必要な成膜装置の設計を開始し、一部の試作を開始する。

また、国立大学法人広島大学は大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構で進めている ICS 実験のレーザー蓄積装置の共鳴維持フィードバック技術開発を行い、光子ビーム生成実験に参加する。開発したレーザー蓄積装置に高反射率鏡導入し高強度蓄積の実証実験、デジタル制御装置のシステム設計、平行して超高レーザー蓄積のための音響光学変調器や電気光学

変調器による高速制御方式、空間位相変調器による高効率レーザー入射の検討を行う。

④ スポーク型超伝導空洞の開発

(再委託先：独立行政法人日本原子力研究開発機構)

参画機関である国立大学法人京都大学と協力して 4 K で高電界加速運転可能な 325 MHz 新超伝導空洞開発を行い、プロトタイプが完成する平成 29 年度に大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構の超伝導試験加速器 (STF) に設置試験できるように開発を進める。

計算機シミュレーションにより、スポーク空洞本体、および、高次モード (HOM) カップラーの最適設計を得る。ニオブ材料を調達し、スポーク空洞の製作に必要な加工性を確認する。既存施設において、325 MHz 空洞の性能測定が行えるよう、必要な装置を整備する。既存の分子線エピタキシー成膜装置 (MBE) にて高量子効率カソードの成膜に必要な環境を構築する。

⑤ 小型高輝度 X 線源を用いた X 線イメージング装置の基盤技術開発

(再委託先：株式会社リガク)

小型常伝導加速器 (LUCX) の性能を上げ、参画機関である国立大学法人東北大学及び独立行政法人産業技術総合研究所と協力して SOI 検出器等を使った X 線位相イメージング取得を行う為の準備を進める。

小型高輝度 X 線発生装置の開発目標仕様に合わせ、X 線位相イメージング装置用検出器の評価選定基礎実験を実施する。小型高輝度 X 線発生装置を用いる X 線位相イメージング装置システムに必要な X 線検出器の選定、評価を行う。SOI、CCD、CMOS 器、Hybrid-pixel semiconductor 検出器等、現在開発中および使用可能な検出器の中から小型高輝度 X 線発生装置の発生する X 線スペクトラムに適した検出器を選定し評価実験を行う。

⑥ クライオ光陰極高周波電子銃開発

(再委託先：学校法人日本大学)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構と協力して、20 K 運転用光高周波電子源の設計・製作を進め、20 K 空洞に必要なクライオスタットの設計・製作を行う。

2.6 セルから成る C-バンド (5716 MHz) の π モード高周波電子銃空洞について、熱損失と加速ビーム性能を最適化する形状の検討を行う。このために、SUPERFISH 等利用できるシミュレーションソフトで空洞内電磁場計算を行い、これに基づきビーム加速シミュレーションを行い、さらにその結果を空洞形状の最適化にフィードバックする。最適化された空洞形状により、20 K における高周波特性を実際に測定するため、低電力試験用空洞の設計を行う。空洞は、冷却した際の目標周波数とのずれ及び設計値の修正量を効率的且つ定量的に求める必要から、常温において若干周波数の異なる 3 種類を設計する。製作は大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構が担当する。製作した空洞の低電力特性を、冷却温度 20 K で測定し、高電力試験用の空洞寸法を決定する。大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構に既存の試験用クライオスタットが、C-バンド 2.6 セルの空洞を設置可能であるため、これを活用する。冷却試験及び空洞の低電力試験では大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構の設備を

利用して行う。この間に、平成 26 年度以降に行う高電力試験に用いるクライオスタットの検討も並行して進める。

⑦ 大強度高繰返しレーザー開発

(再委託先：学校法人早稲田大学)

50 から 200 W 高繰返しモードロックレーザー開発を目標にして、高出力レーザー装置開発を進め、その性能試験を大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構の光共振器を使った高輝度光子ビーム発生測定により行う。

⑧ 小型加速器を用いた逆コンプトン散乱光源による最適なイメージング手法の開発

(再委託先：独立行政法人産業技術総合研究所)

独立行政法人産業技術総合研究所は所有している小型加速器を使った X 線検出およびイメージング法に関する相補的な研究開発を大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構と協力して推進する。独立行政法人産業技術総合研究所 S バンド小型リニアック施設において、最大 42 MeV の電子ビームと衝突用レーザーシステムを整備し、逆コンプトン散乱 X 線生成を実施する。逆コンプトン散乱 X 線を用いたイメージング手法として、密着法・インライン位相コントラスト法・集光撮像法を調査すると同時に検出器のサーベイ研究を行う。

⑨ スポーク型超伝導空洞開発に於ける設計及び非破壊検査

(再委託先：国立大学法人京都大学)

参画機関である独立行政法人日本原子力研究開発機構と協力して 4 K で高電界加速運転可能な 325 MHz 新超伝導空洞開発を行い、プロトタイプが完成する平成 29 年度に大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構の超伝導試験加速器 (STF) に設置試験できるように開発を進める。

独立行政法人日本原子力研究開発機構で行うスポーク空洞本体、および、高次モード (HOM) カップラーの設計最適化の過程において、計算機シミュレーションによるマルチパクタリング解析を行う。マルチパクタリングが運転の障害となる可能性のある事が判明した場合、設計へ反映させる。複雑な構造を持ったスポーク空洞における非破壊検査の手法について設計検討を行う。超伝導高周波国際会議 2013 に参加し、超伝導空洞高分解能内視鏡や Tmap, Xmap 等、非破壊検査に関する発表を行い、同時に、超伝導加速器の世界動向について調査を行う。

⑩ 小型高輝度 X 線発生装置を用いた X 線位相イメージング法の開発

(再委託先：国立大学法人東北大学)

小型常伝導加速器 (LUCX) の性能を上げ参画機関である株式会社リガク及び独立行政法人産業技術総合研究所と協力して SOI 検出器等を使った X 線位相イメージング取得を行う為の準備を進める。

X 線位相イメージングを実施するには、Talbot 干渉計あるいは Talbot-Lau 干渉計を X 線源の空間的干渉性に応じて構築する必要がある。まず、X 線源の空間的干渉性を設計値およびでき

れば実験によって調べ、それに基づいた数ミクロンの構造識別が行える干渉計設計を行う。その際に光学素子として使用する X 線透過格子の設計もこれまでに開発したシミュレータを駆使して行う。X 線格子の一部は振幅格子であり、その周期は X 線の空間的可干渉距離と同等以下である必要がある。これは高アスペクト比のストライプ構造を要求する。格子の評価方法としては、実験室 X 線源を用いた撮影実験による評価を実施する。

⑪ プロジェクトの総合的推進

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構は本研究課題全体を円滑に運営していくため、本事業の PO 及び PD との連絡を密にとりつつ、各参画機関の連携・調整を行うとともに、課題間の連携強化、研究者間の交流促進を図る。各参画機関の連携・調整にあたっては、本課題全体打合せを 2 ヶ月に 1 度、各機関持ち回りで行う。また、プロジェクトで得られた成果については、積極的に公表し、今後の展開に資する。

2.2 実施内容（成果）

① X線生成性能向上のための技術開発および各要素技術の開発支援

概 要

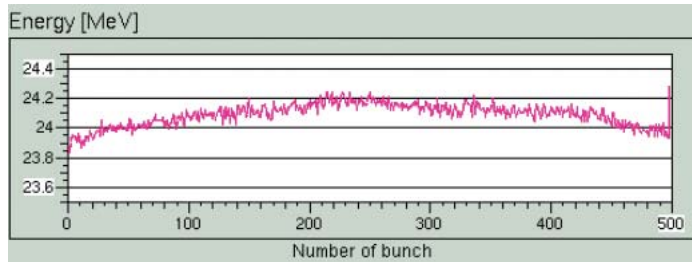
既存のレーザー蓄積共振器を含む小型常伝導線形加速器（LUCX）のX線生成性能を上げ、X線検出器開発やX線イメージング手法開発の為の実験を行った。現状10 keVから20 keV X線領域で毎秒 10^6 光子数生成程度であるが、平成25年度中にX線発生光子数を 10^7 程度まで上げた。その為に電子ビームパルス幅を拡げ1000 bunches/pulse 加速運転を可能にした。また、レーザー蓄積パワーがICS時100 kWから214 kWまで増強すると同時に、衝突点での両ビームを60 μm （標準偏差値）程度にした。学校法人日本大学が開発するクライオ高周波電子銃の設計・プロトタイプ製作に協力した。また、学校法人早稲田大学がファイバーレーザー増幅技術を使った50 Wレベルの357 MHzモードロックレーザー発生装置製作を開始するので、レーザー発振器やクリーンルームを提供して協力した。そして、ファイバーレーザー増幅技術を使った50 Wの357 MHzモードロックレーザー発生装置製作及びその装置と新光共振器を使った300 kW蓄積実験を行い、蓄積安定度等のデータを取得した。下図（参考データ）にICS時100 kW蓄積の場合、X線Fluxの測定分布を示す。

国立大学法人広島大学と協力してレーザーパルス蓄積共振器のフィードバック性能を上げる実験を行い、増大率1280倍を達成した。また、 10^7 から 10^8 photons/secのX線フラックスを使ったイメージング取得実験の結果を分析することによって、X線検出器開発やX線イメージング手法開発の為の最適なX線測定系の詳細設計を進めた。しかし、真空中に設置したMCP（マイクロチャンネルプレート）により、X線から電子に変換した後、蛍光版で吸収イメージ像を取得したが、バックグラウンドの影響が予想より大きい為に、最適化の知見を得る実験装置まで試験ができなかった。今後は、バックグラウンドを10分の1以下になるように電子ビームの軌道制御と品質向上技術を改善する。

①-1 LUCXでの研究開発成果

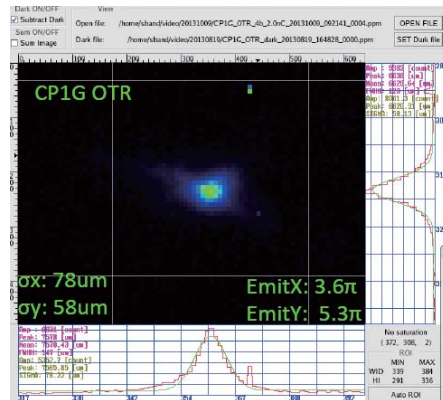
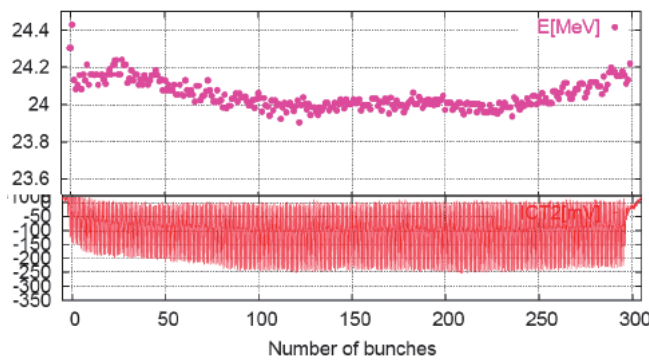
高周波光電子銃の性能を上げる為に、RF Agingを行い300 bunches/pulse ビームから600 bunches/pulse ビーム生成・加速まで確認できた。加速空洞への入力高周波パワー不足によりビーム負荷補正が不十分になり、多バンチ電子ビームエネルギー拡がりが大きく、定常的に運転することが困難になった為、さらなる性能向上を目指して平成26年度にビーム負荷補正を効率的に行う技術を開発することとした。①-図1に0.6 nC/bunch、500 bunches/pulseのバンチエネルギー測定結果を示す。マルチバンチエネルギー拡がりを0.1%（標準偏差値）以下まで調整する必要があるが、ビーム負荷補正が十分に行えていない為に0.2%程度になっている。1.26 nC/bunch、300 bunches/pulse 実験では、①-図2に示すようにマルチバンチエネルギー拡がりを0.1%（標準偏差値）近くまで調整でき、電子ビームサイズを60 μm 程度に調整できている。ビーム負荷補正を精密に行うRF振幅変調器を導入すれば、0.6 nC/bunch、1000 bunches/pulse 運転で電子ビームサイズ30 μm の衝突実験が行える見通しが得られたと言える。参考資料として、十分な調整に至らなかった場合の1000 bunches/pulse 加速のビームエネルギー及び位置測定結果を示す。

ビームダンプまで輸送できたパルス当りの電荷量は 450 nC であった。バンチごとのビーム負荷補正を十分に行えるように加速高周波パワー制御装置を追加して、平成 26 年度にレーザー強度を上げた上で、1000 bunches/pulse での X 線生成実験を行う。この実験によって、小型 X 線発生装置の実用化の為のモデル設計に進む予定である。

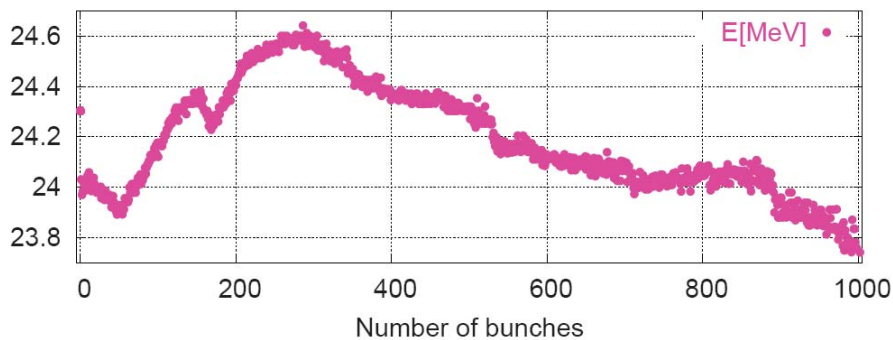
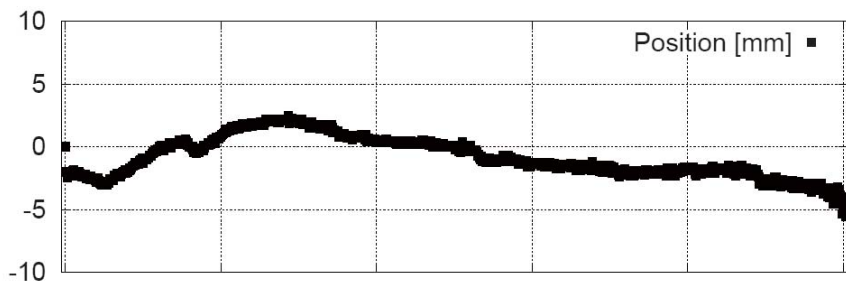


①-図 1. 0.6 nC/bunch, 500 bunches/pulse の各バンチのエネルギー

参考データ：X線 Flux 測定分布 (laser energy 280 μJ 時)



①-図 2. 1.26 nC/bunch、300 bunches/pulse のとき、各バンチのエネルギーと電子ビームサイズ。



参考データ：1000 bunches/pulse 加速実験の各バンチのエネルギーと位置測定結果。このビームでは全バンチのエネルギー拡がりが大きく、Compton 衝突実験に使えないものであった。ビーム負荷補正を正確に行えるように、高精度高周波パワー制御装置を追加する予定である。

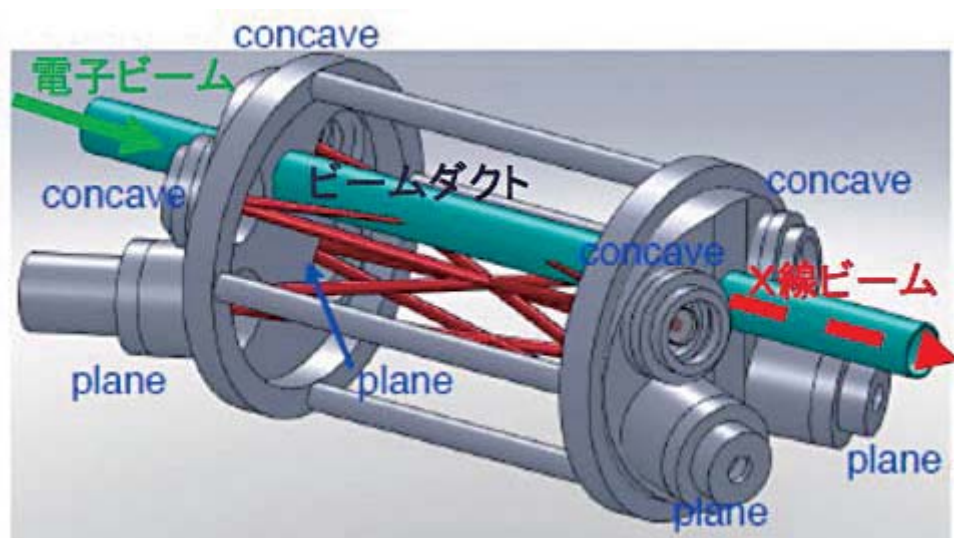
一方、光共振器のレーザー強度増強実験では、400 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ でミラー表面を破壊したが、加速器室内の光共振器を覆った①-図3のクリーンブース内で慎重にミラーを交換した結果、600 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ までミラー破壊が起きないことをX線強度測定により確認できた。このレーザー強度は214 kWに相当する。準備できた増幅器の容量不足と飽和現象の為、現状の最大値は214 kWである。主バースト増幅部のレーザーサイズを大きくできるように光学台を拡張し、半導体励起部のパワー効率を改善することによって、設計上最大値1000 kWの値が得られるように改善する。X線生成実験では、CdTe半導体検出器でX線エネルギー較正を行い0.1 keV程度の精度で測定できていることを確認した。X線検出器に入るフラックスは、SOIの測定値で約 3×10^7 光子/秒に増強できた。ビーム負荷補正、1000 bunches/pulse、ビームサイズ30 μm 、6 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ (2 MW 相当) を実現すれば、X線検出器で 10^8 光子/秒が確認できる。X線フラックス 10^8 光子/秒以上の生成装置の製作見通しが得られた。



①-図3. クリーンブース

①-2 小型エネルギー回収型リニアック試験施設 (cEERL) での研究開発準備状況

平成25年度末からcEERLが運転を開始して、10 μA -8MV/m加速によるエネルギー回収技術を実証した。本計画の高輝度X線発生のために、今後加速電流と電界を上げ目標である35 MeV、10 mAを実現するように加速器運転調整が繰り返される。一方、我々は逆コンプトン散乱標的である大強度レーザーパルス蓄積装置開発を開始した。光共振器は偏光X線切り替えが電子バンチ繰返し速度で行えるように①-図4に示す8鏡光共振器とすることとした。本光共振器は2組の光共振器を合体させているので、X線強度は2倍になる。次年度夏までに本光共振器を完成させ、レーザーパルス蓄積後、平成26年11月からcEERL加速器内に設置する予定である。



①-図4. 8鏡光共振器、横置き光共振器を設計中。cEERL用。

①-3 クライオ高周波電子銃の設計・プロトタイプ製作状況

学校法人日本大学が製作するクライオ高周波光電子銃のプロトタイプの高精密加工を KEK で行った。製作したプロトタイプ高周波電子銃空洞の特性測定が行える状況になった。詳しく測定結果等は、⑥-4 に記載する。

①-4 モードロックレーザー発生装置製作状況

Yb 光ファイバ技術によるモードロックレーザー発振器および繰返し通倍光共振器実験は学校法人早稲田大学で行われ、KEK では大強度レーザー試験および光共振器開発用クリーンルーム内への移設準備を行った。早稲田大学での実験結果は⑦-1.2 に記述する。

①-5 X線検出器およびX線イメージング法の研究開発状況

平成 25 年度は、SOI イメージセンサーの X 線検出器としての実用化に必要な課題を克服するための研究開発に従事した。具体的には、(1) 大面積化、(2) 高感度化、(3) 安定した読み出しシステムの構築である。光・量子融合連携プロジェクトで発生させる高い X 線エネルギーに対して感度を高くするためには、センサーを厚くし、低い電圧で全空乏化駆動できることが必要である。そのため、従来の N 型 CZ 基板 (n-type Czochralski (CZ) wafer, 260 μm 厚, NCZ) ではなく、新たに N 型 FZ 基板 (n-type Floating Zone (FZ) wafer, 500 μm 厚, NFZ) を採用し組み立ておよび評価試験を行った。近年 NFZ の歩留りが向上したので、500 μm 厚のセンサーが約 200 V でほぼ全空乏化状態で使用できるようになった。さらに、低ノイズ化に成功したため、常温でも長い積分時間 (10 ms) で X 線像を取得することができるようになった。30-50 keV の高い X 線エネルギーによる放射光単色 X 線を用いた X 線像取得試験を行い、17 μm 角ピクセルサイズの INTPIX4 により高解像度の X 線像を取得することに成功した。また、12 μm 角の INTPIX6, 7 を新規に開発した。これらについては放射線耐性を向上させるために、従来の NFZ, NCZ に加えて、PFZ (p-type FZ), 2 重 SOI にも対応できるようにした。また、INTPIX7 については、これまで最大の 18 \times 12 mm サイズから、18 \times 18 mm サイズへとチップ面積を大きくし、有効面積



①-図 5. INTPIX7 SOI イメージセンサーおよび実装基板。

も 16.896×16.896 mm、画素数も増加した。これにより今までよりも広範囲にわたって X 線像取得が可能になる。また、今回開発が進んだ INTPIX4 積分型イメージセンサーと LUCX 試験加速器との組み合わせ試験を行い、準単色 X 線による金属エッジの位相コントラスト像取得試験を行った。十分な統計を得るためには X 線強度をさらに大きくする必要があるが、この新たな測定手法について Background を低減させる手法などの重要な知見を得たので、平成 26 年度以降の試験に反映させる予定である。データ収集システムに関しては、従来使用していた読み出しボード“SEABAS2”用ソフトウェアのデバッグを進めた。過去の量子ビーム実験ではデータ転送中に、周期的に不感時間が増える問題があったので、読み出しプログラムの改良を行い不感時間の低減を試みている。平成 26 年度以降の量子ビーム実験や LUCX 試験加速器実験に採用しプログラム改良の成果を確認する予定である。また、X 線検出器実用化のための課題克服のために SOI 読み出し回路試験チップを設計試作し評価試験を行った。

② 超伝導高周波加速空洞運転技術の確立

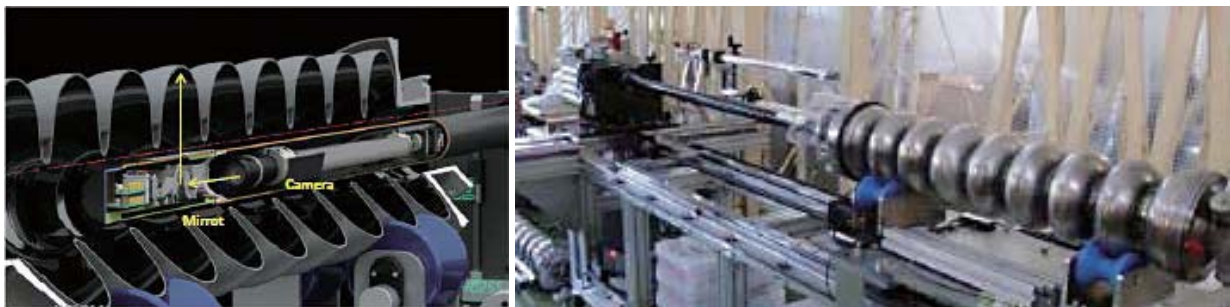
概 要

KEK では超伝導加速器の運転性能を上げる為に、加速勾配の限界の原因を各種の表面処理法の適用・空洞内面検査などにより追及する。パルス 30 MV/m 超伝導高周波加速空洞運転技術および連続波 15 MV/m 超伝導高周波加速空洞運転技術を確立した。今後、電子ビーム加速状況下で本加速性能が実現できるように性能向上のための研究開発を推進する。

本項目の基盤技術研究開発は超伝導リニアック試験施設（STF）と cERL において実施した。STF の加速エネルギー増強計画は超伝導加速空洞増設により 60 MeV から 300 MeV まで 10 mA 電子ビームエネルギーを上げ、1msec-5Hz 運転を安定に実現することである。平成 25 年度は 1 m 長の 9 連超伝導空洞試作を行い、高電界試験においてパルス運転で 35 MV/m 以上の加速勾配達成実績を上げた。一方、cERL 開発では、高電界試験において連続波 24 MV/m 運転を実現したが、平成 25 年度電子ビーム加速試験においては 10 μ A-8MV/m 加速によるエネルギー回収技術実証を確認するにとどまった。平成 26 年度中に加速勾配と加速電流を上げながらエネルギー回収技術実証試験を進展させ、平成 27 年 1 月から逆コンプトン散乱による高輝度 X 線生成実験を開始する予定である。

②-1 STF での超伝導空洞研究開発状況

KEK は超伝導空洞製作技術を発展させる為に、②-図 1 の超伝導空洞内表面検査装置と超伝導空洞製作機を導入した。これによって、始めて in-house 空洞製作で縦測定 37 MV/m の 1 m 長超伝導空洞製作に成功した。その測定結果を②-図 2 に示す。また、②-図 2 に今まで縦測定で得られたパルス運転と連続運転の高電界測定結果も示した。この測定結果から、パルス運転では、37 MV/m でクエンチが発生して、この in-house 空洞ではこれ以上の高電界を発生できない状況であった。

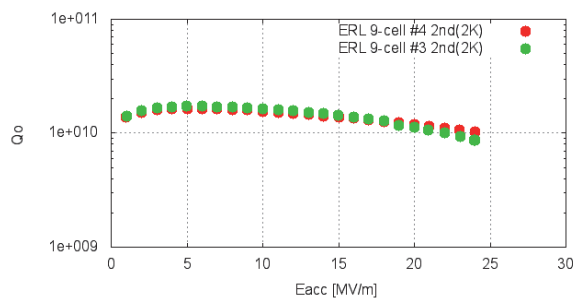
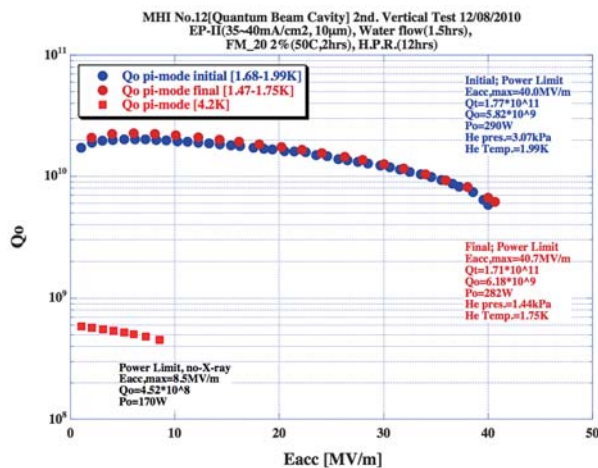
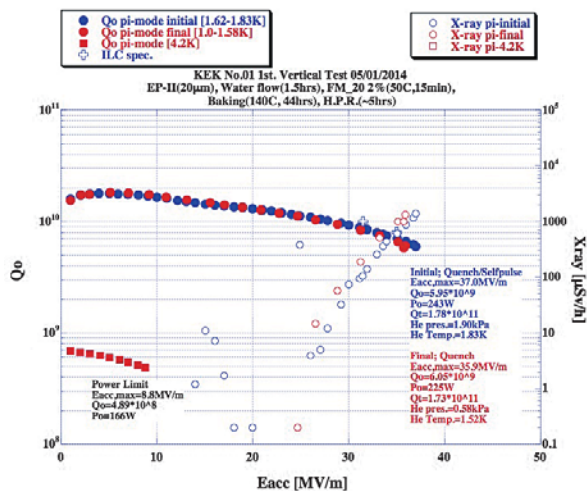
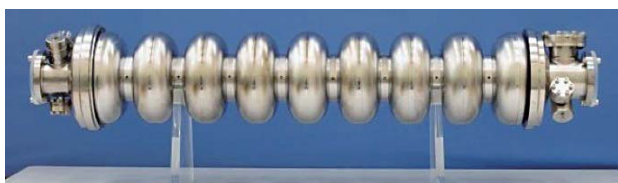


②-図 1. 超伝導空洞内表面検査装置

②-2 cERL での研究開発状況

平成 25 年度電子ビーム加速試験において、10 μ A-8MV/m 加速によるエネルギー回収技術実証を初めて行った。本エネルギー回収実験は、一周した電子ビームを減速フェーズに載せて、ビームダンプ前で電子ビームエネルギーと電荷量を測定することによって確認した。電子ビームエネルギーはほぼ入射時のエネルギーになり、電荷量も入射時の電荷量であることを確認したので、ほぼ 100% に近いエネルギー回収を確認したことになる。厳密な測定を行えば、アー

ク部で発生する放射光エネルギー損失や真空容器との相互作用で発生するエネルギー損失の合計数%損失が確認できるが、本測定実験では電荷量は 1000 分の 1 以下であり、測定器の感度が不十分であった。



②-図 2. In-house パルス超伝導空洞性能。

参考データ：上図は 2010 年のパルス超伝導空洞性能測定結果、下図は 2012 年の連続波超伝導空洞の性能測定結果。

③ 光高周波電子銃用新マルチアルカリ光カソードおよびレーザー蓄積装置のフィードバック技術開発

(再委託先：国立大学法人広島大学)

概 要

従来の Cs₂Te カソードから可視光励起できる物性的に有望であるマルチアルカリの高量子効率カソードについて、数%の量子効率や数ヶ月以上への寿命の改善に必要な条件を系統的に調べた。平成25年度は、研究開発の初年度として、マルチアルカリカソード成膜試験装置の設計、製作、基本動作試験を行い、さらにカソード蒸着試験を行った。本蒸着試験により、473 nm レーザー光に対して、7%を超える量子効率を確認した。また、蒸着条件の最適化を行い、真空容器内で保管した場合の 1/e 劣化寿命を測定し、数千時間を超える長寿命を確認した。また、並行して加速器への実装に必要な成膜装置の設計を開始し、一部の試作を開始した。

本技術開発は、平成24年度までの実績をもとに、レーザー蓄積強度をさらに向上させ、最終的には平均蓄積強度として1 MW を目指している。平成25年度はこれまでの研究開発をもとに、目的を達成するための課題の洗い出しと、その解決に方法の明確化と指針を示すことに重点をおいた。具体的には、レーザー蓄積強度増大にともなう鏡上の熱損失の克服、蓄積装置内におけるレーザー光伝搬状態の理解である。これらを基に平成26年度に汎用デジタル制御システムの検討を含む、蓄積率向上実験を行う予定である。

③-1 光高周波電子銃用新マルチアルカリ光カソード開発

フォトカソードによる電子生成は、従来の熱電子銃による電子ビームに比べ、短パルス電子ビームが直接生成可能であること、スポット径に対する操作性が高いこと、最適化により極めて小さいビームエミッタンスが実現可能であること、などの点で優れており、FEL を始めとする先進的加速器利用において大きな役割を演じている。このような優れた特性を活かすには表面電場の大きい RF 電子銃を利用する必要があるが、大きな表面電場、暗電流等によるダメージ、残留ガスの表面吸着による特性の劣化など、フォトカソードは電子銃中での様々なプロセスにより劣化してしまう。通常、運転可能時間、あるいは量子効率（レーザー光子と電子との数量比）が 1/e となる時間等を寿命と称するが、性能が優れていても、この寿命が短い場合、実用化は困難である。これまで、加速器電子源用のフォトカソードとしては、Cu などの金属カソード、Cs₂Te などの薄膜半導体カソード、GaAs などの結晶半導体カソードなどが利用されてきた。金属カソードは一般的に堅牢であり、高い耐久性、長い寿命を有するが、仕事関数が大きいため電子ビーム発生に紫外レーザー光を必要とすること、光の侵入長が短いために量子効率が 0.01% 以下と非常に小さいこと、したがって大パワーレーザーを必要とし、大電流発生は困難である点などが短所である。一方、GaAs 半導体カソードは、活性化により高い量子効率を実現可能であること、近赤外光でも電子ビーム生成が可能であること、結晶バンド構造を利用したスピン偏極ビーム生成が可能であること、などが長所であるが、極端に寿命が短いのが短所である。Cs₂Te 薄膜半導体カソードは、高い耐久性と、1-10% 程度の高い量子効率が利点であるが、金属と同様に紫外光が電子ビーム生成に必要である点が欠点である。一方、マルチアルカ

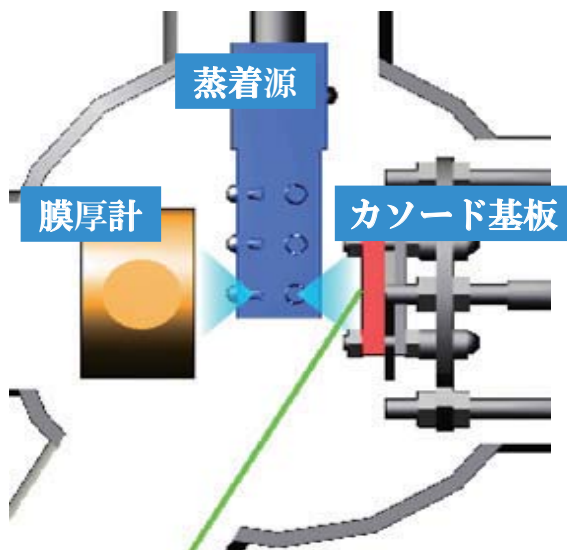
リカソードは複数のアルカリ金属から成る薄膜カソードであり、固体レーザーの二倍波である 530 nm 程度の波長の光に対して 1-10% 程度の高い量子効率を持つことがわかっている。通常、短パルスレーザー光を生成するには、Ti:Sapphire や Nd:YAG などの固体レーザーでパルスを生成し、その基本波から倍波生成などの技術を利用して所望の波長のレーザー光を得るが、倍波発生効率の効率はパワー密度に依存し、20% を超えることは困難である。つまり、短波長のレーザー光が必要な場合、より大きなパワーの基本波のレーザーが必要となる。緑色光で耐久性の高い、量子効率の大きなフォトカソードが開発されれば、フォトカソード電子銃で必要となるレーザーへの負荷が大幅に軽減され、生成されるビーム性能の幅も大幅に広がり、極めて大きなインパクトが予想される。本研究は、緑色励起可能なマルチアルカリカソードの高耐久化を実現し、Cs₂Te や GaAs などの既存のカソードに代わる高性能で高耐久なカソードを実現し、フォトカソード電子発生普及による先進的加速器利用の普及、熱電子銃の代替などによる既存施設の高性能化などを旨とするものである。広島大学は可視光で使用できる長寿命カソードの研究開発を推進する。

平成 25 年度は、開発の初年度として、マルチアルカリカソード蒸着装置の設計、製作、試験を行った。また、加速器施設への実装を視野に、加速器への実装が可能な可搬容器対応型の蒸着装置の設計、製作を開始した。

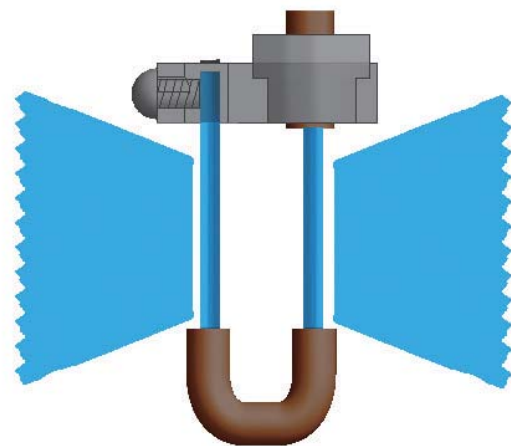
③-1.1 マルチアルカリ蒸着試験装置の開発と試験

③-図 1 は製作したマルチアルカリ試験装置の概要を表している。装置全体はステンレス製の超高真空容器内に収められ、イオンポンプと NEG ポンプによる排気で、通常 3.0×10^{-9} Pa 程度の真空圧力が得られている。

③-図 2 に示すように、容器内には金属蒸気を発生させる蒸着源、カソードを生成させる基板、そして蒸着膜厚の測定のための水晶振動子膜厚計が設置されている。蒸着源は Cs, K, Sb の蒸気を発生させることができる。Sb 蒸気は、Sb 細粒をタンゲステン細線で作られたヒーターで



③-図 1. マルチアルカリ試験装置の概要。中心の蒸着源から蒸気が発生し、カソード基板および膜厚計に金属が蒸着される。



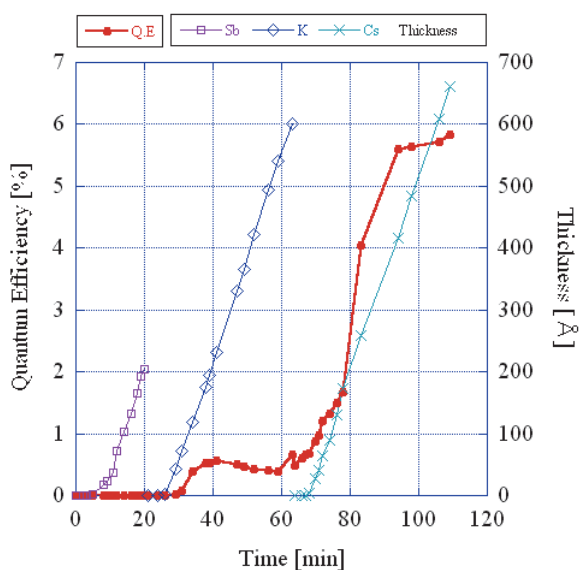
③-図 2. 蒸着源におけるディスペンサーの配置。左右対称に蒸気が発生するようにしている。

加熱することで発生させる。Cs と K は SAES Getter 社製のディスペンサーを使用している。

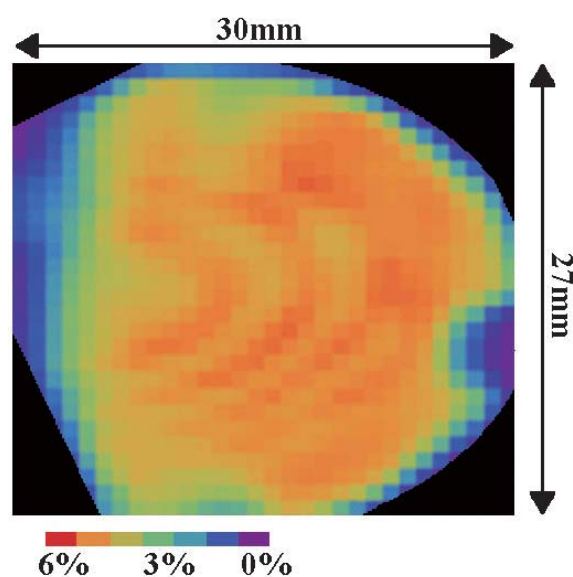
カソード基板上に蒸着された各金属の量を膜厚計により正確に把握するためには、蒸着源からカソードと膜厚計の二方向に同様に蒸気が発生する必要がある。Sb はタングステンヒーターにより加熱するので、蒸気は等方的に発生する。一方、ディスペンサーは針金状の本体にあるスリットから蒸気が発生する仕組みのため、スリット側にしか蒸気が発生せず、蒸着むらによりこのままでは膜厚計による計測は困難である。この困難を解決するため、ディスペンサーを③-図2に示すように、二本配置し、かつU字型の電極で接続し、同じ電流が流れるようにして、金属蒸気が対称に発生するようにした。これにより、カソード基板への蒸着量を膜厚計により測定可能となり、蒸着時の膜厚の同時計測、膜厚によるマルチアルカリ生成条件の最適化が可能となる。

③-図3は蒸着試験の結果である。横軸に時間(分)をとり、縦軸は量子効率(左軸、●)、および膜厚(右軸)を示している。□、◇、×はそれぞれSb, K, そしてCsの膜厚を示している。蒸着はこの順番で行い、蒸着中は基板温度を100℃程度に維持している。量子効率は473 nmの青色レーザーにより計測している。K蒸着中に量子効率が上昇を始め、Cs蒸着によりその値を急激に増大させる。Cs蒸着終了時点で6% 不足であった量子効率は、蒸着停止後もじわじわと上昇し、7% 超という値を達成した。

③-図4は473 nmのレーザーにより計測した量子効率の二次元分布である。二次元分布はレーザーの照射位置を機械的に移動させながら光電流を計測することで取得した。色が量子効率の大きさを表し、赤が量子効率の高い(6%)領域、紫が量子効率の低い(0%)領域を表している。黒い部分は、カソード基板の外、あるいはビューポート等によりレーザー照射視野外の部分を表している。これより、20 mm 四方程度の領域において、数%程度の範囲内で均一な量子効率を持つカソードが生成されていることがわかる。



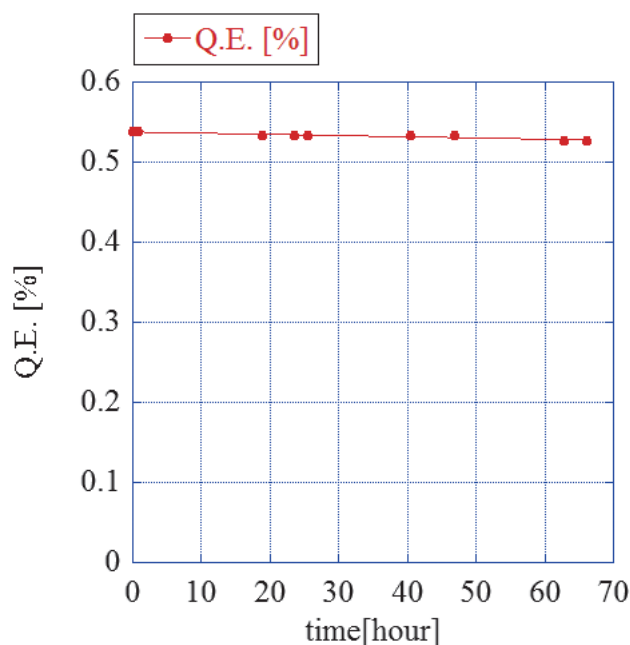
③-図3. 蒸着試験の結果。横軸は時間(分)、縦軸は量子効率(左軸、●)、および膜厚(右軸)を示している。□、◇、×はそれぞれSb, K, そしてCsの膜厚を示している。



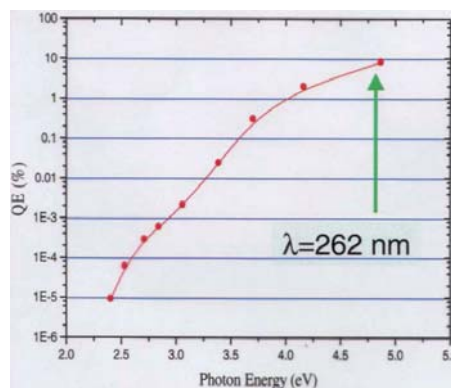
③-図4. 蒸着生成したマルチアルカリカソードの量子効率の二次元分布。黒い部分は基板境界やビューポートによる死角などで、それ以外の場所での量子効率を赤(6%)から紫(0%)までの色により示している。

③-図3は寿命試験結果を示す。カソード生成後、量子効率の時間変化を測定した。レーザーには530 nmの緑色レーザーを使用した。●が測定点を表し、測定時以外はレーザー照射をおこなっていない。すなわち、カソードの時間経過による劣化を表している。このデータではわずかな量子効率の劣化が見られ、時間による指数関数的な減少を仮定すると、1/e寿命は3500時間程度と見積もることができる。この寿命は100日以上に相当し、通常の加速器運転では二週間に一回程度のメンテナンスが実施されるので、この寿命は加速器運転には十分であるといえる。すなわち、本カソードの高い耐久性が確認されたといえる。尚、③-図3から③-図4の測定で照射レーザー波長が473 nmから530 nmに変わっている。これは測定が蒸着装置とレーザーの使用状況に依存した為である。参考資料として③-図5にCs₂TeカソードのQEレーザー波長依存性測定結果を示す。

一方、先進的加速器では時間的な耐久性に加え、大きな電流をとりだした際の耐久性も課題となる。これについては、大電流引出試験に必要な光源、バイアス電源、等の整備が必要となり、平成26年度以降の課題として取り組んでいく。平成25年度の成果として、7%を超える量子効率(473 nm)を実現し、また高い時間耐久性をもつことを示すことができた。



③-図5. 寿命試験の結果。横軸は時間、縦軸は530 nmの緑色レーザーで測定した量子効率である。測定点以外ではレーザー照射はしていない。

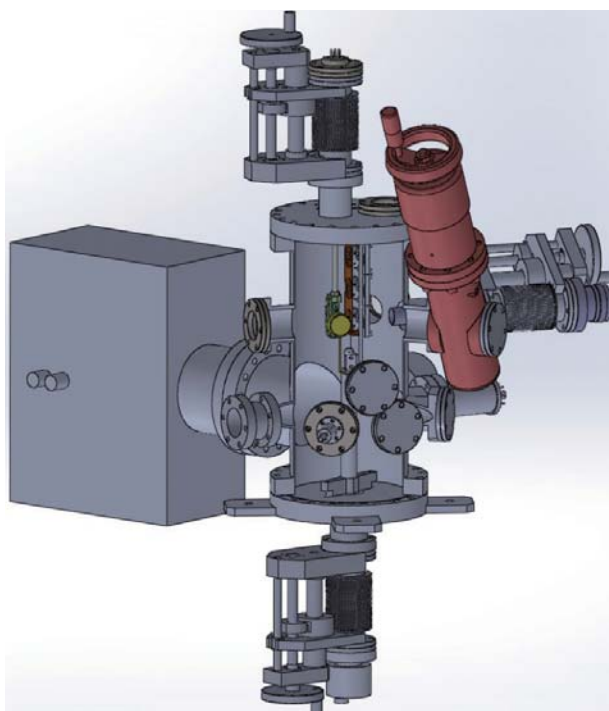


参考資料：Moカソードプラグ上にCs₂Te薄膜を蒸着した場合、量子効率(QE)のレーザー波長依存性。一般に光子エネルギーが高くなれば、QEの高い値が実現できるが、電子ビームの規格化エミッタンスは悪くなる。長波長レーザー(可視光領域)でQEが1%に以上なるlong lifeカソード開発を本マルチアルカリカソードで実現することを目標にしている。

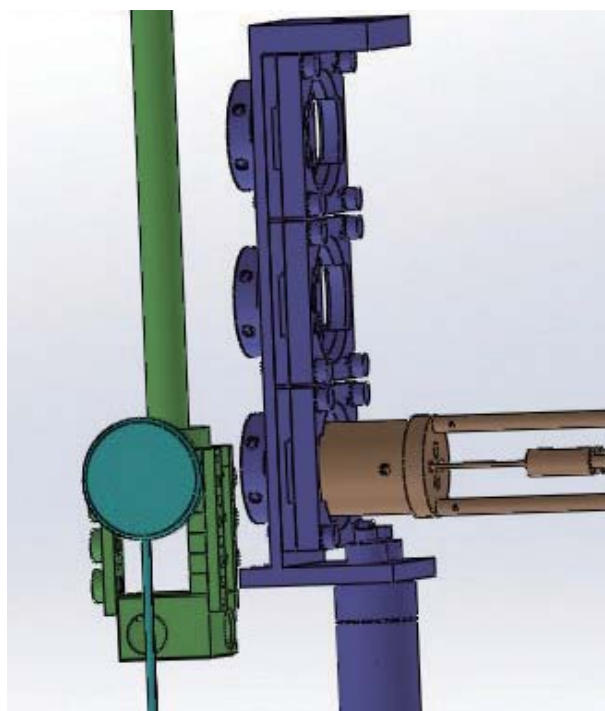
③-1.2 可搬容器対応型マルチアルカリカソード蒸着装置開発

本テーマでは、マルチアルカリカソードの高い耐久性を実証し、かつ最適化により、さらに高い性能を実現するとともに、実際の加速器での運転実証も課題の一つである。実際の加速器での運転を考える場合、電子銃内部で直接蒸着カソードを生成することは、蒸気が真空容器内にひろがり、空洞内壁面にも蒸着され、思わぬ真空放電などの原因となるために好ましくない。そのため、電子銃とは別の容器内でカソードを生成し、電子銃へ移送する必要がある。カソー

ドは酸素などへの暴露によりその性能が失われてしまうため、電子銃と蒸着容器は真真空的に結合されている必要がある。電子銃との間に輸送機構などを設けた蒸着容器を併設して実装するのも可能であるが、マルチアルカリのような開発要素のあるカソードの場合、加速器の運転とカソードの生成や試験などが同居できないと、多くの不都合が生じる。その問題を解決し、加速器の運転とカソードの生成や試験が同時に行えるように、電子銃とは別に蒸着容器をつくり、その間を可搬容器でカソードの移動を行うことを検討している。③-図2は可搬容器対応型の蒸着装置の概念図で、排気装置や蒸着源などに加えて、カソードホルダーと呼ばれる外部から導入したカソードを塗布する小型の部品（カソードパックと呼ぶ）を固定する装置を備えている。ゲートバルブを通して外部から導入されたカソードパックはカソードホルダーに固定され、マルチアルカリ試験装置と同様の手順で表面にマルチアルカリカソード蒸着生成を行う。③-図3はカソード蒸着生成時の概念図で、温度管理のためのヒータが背後から密着して温度を制御し、蒸着源に通電することで蒸気を発生させる。膜厚による蒸着量制御のために膜厚計がやはり設置される。カソードの移動は、カソードパック移動用のロッドやゲートバルブを備えた真空容器で行い、蒸着容器に結合した後、結合部の排気を行い、その後ゲートバルブを開け、ロッドによりパックの移動を行う。この可搬容器の開発は KEK で行われている。可搬容器対応型蒸着装置の製作と実用化は H26 年度に行う予定である。



③-図6. 可搬容器対応型マルチアルカリカソード蒸着装置の概念図。容器中央にカソードホルダー、蒸着源などを配置し、外部から導入したカソードパックに蒸着を行う。



③-図7. カソード蒸着時の様子。中央がカソードホルダー、背後からヒーターを挿入し、温度を管理する。左側のロッド先端が蒸着源、円形のが膜厚計である。

③-2 レーザー蓄積共振器開発における状況

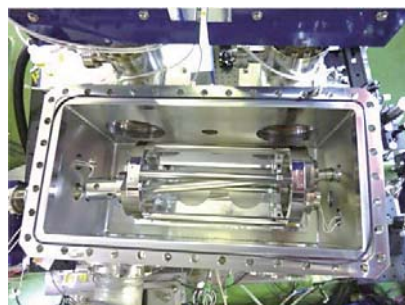
③-2.1 序

本委託業務である、小型加速器による X 線源の開発では、レーザーと電子の散乱の効率を上げ、応用に十分な強度の X 線を供給することが課題となる。その方法として電子線、レーザーの双方の開発とそれらを総合システムとして組み上げることが必要となる。

本研究では、レーザー光の強度を向上し、X 線強度を増大する技術の開発を担当する。高反射率鏡を組み合わせた光共振器にレーザーパルスを入射し、位相を合わせて蓄積することにより、共振器内部でレーザーパルスのエネルギーを増大する。さらにレーザー光を電子線との衝突点において、集光する。これを行うためには、共振器をレーザー光と共鳴させることが必要である。レーザー蓄積装置は光共振器とも呼ばれる。光共振器がレーザー光と共鳴するためには、共振器内における光の光路長 L とレーザー光の波長 λ が、 $L = n\lambda$ の関係を満たす必要がある。ここで n は任意の整数である。さらにレーザー光の共振器内での強度増大率を A とすると、光路長 L を $\lambda/(\pi A)$ 以下の精度で制御する必要がある。レーザー光の波長 λ は $1 \mu\text{m}$ 程度なので、増大率 1000 倍を達成するためには光路長を 250 pm 以下の精度で制御しなければならない。したがって、光共振器の実現には光路長の高精度制御技術の開発が鍵となる。さらに、共振器内のレーザー光強度が増大するにつれて、使用する光学素子の強度耐性も課題となる。

③-2.2 共振器開発の状況

広島大学、KEK、早稲田大学のグループはレーザー蓄積共振器の開発を協力して進めてきた。また、フランス線形加速器研究所 (LAL) のグループとも技術協力を行っている。特に平成 20 年度から 24 年度は文部科学省「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」(レーザー蓄積装置および大強度高品質電子源開発)において、また平成 25 年からは本委託業務において、レーザー蓄積装置の開発を行っている。本委託業務前までに 3 次元 4 枚鏡レーザー蓄積共振器を開発し、KEK の電子加速器 (ATF) において光子生成に成功している。

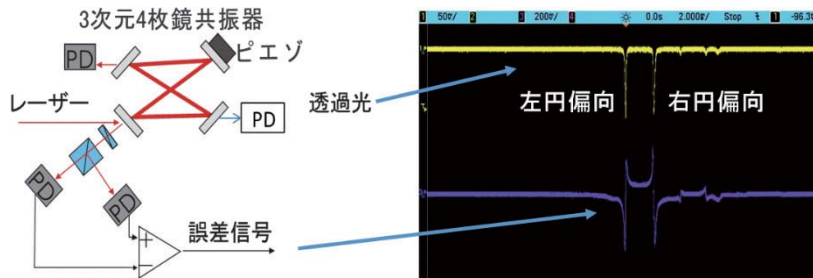


③-図 8. KEK の ATF 加速器内に設置した 3 次元 4 枚鏡共振器

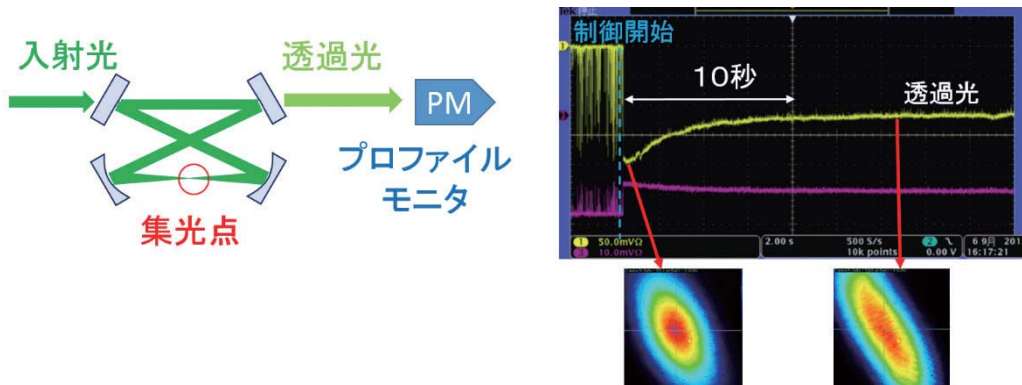
③-図 8 は ATF 加速器に設置した 3 次元 4 枚鏡共振器である。

本委託業務で、③-図 9 に示すような、この共振器の開発過程において考案した、偏極特性を利用した新しい共振器制御方式を応用しているレーザー蓄積共振器を KEK - ATF 加速器に設置し、その状態で、平均蓄積強度 2.6 kW 、蓄積増大率 1280 倍を達成した。さらに 2.6 kW 蓄積時の強度揺らぎは 37 W (1.4%) である。共鳴の半値幅が 260 pm であることを勘案すると、これは共振器中の光路長 (共振器の周長) の長さを 16 pm の精度で制御できたことに対応する。この状態で ATF 加速器の電子線とレーザーの衝突による光子生成を行い、1 秒当たり 2.7×10^8 の γ 線を生成することができた。

共振器の共鳴維持の為に高精度制御に成功し、それを用いた光子生成を実現したが、実用に供する強度の光子生成を達成するには、さらにレーザー蓄積強度を向上させる必要がある。こ



③-図9. 3次元4枚鏡共振器の偏極特性を利用した共振器制御構成（左）と直線偏光レーザーを入射し、共振器長を変化させながら測定した、透過光（共振器内に蓄積されているレーザー光強度に比例。黄色）と共振器制御信号（誤差信号、紫）の様子。本共振器が円偏光のみに共鳴し、左右偏光が独立して共鳴している。また、誤差信号が共鳴状態を反映している。



③-図10. 制御開始後の蓄積強度（透過光強度で測定）と透過光の形状の変化。測定は、左図に示したプロファイルモニターの位置（共振器外部）で行った。蓄積開始後から変化していることがわかる。また蓄積開始直後においても透過光の形状が楕円であるが、これは共振器内部の電子線との衝突点においても楕円となっていることを示唆している。

れまでの研究において、それに向けた課題も明らかになっている。③-図10はレーザー蓄積の開始時点からのレーザー蓄積強度の変化を示している。レーザー蓄積開始から10秒程度で強度が低下していることが分かる。同時にレーザーからの透過光の形状も変化している。レーザー蓄積強度をさらに向上するためには、この問題の原因究明と解決が重要であり、平成25年度の後半はこれに重点をおいた。

③-3 レーザー蓄積共振器の性能向上にむけた研究

③-3.1 序

③-2.2において記述した課題は以下のように纏めることができる。

1) 蓄積強度の減少および、レーザー光形状の変化は、共振器に用いた鏡上の熱損失による微小な変形に起因すると考えられる。

2) 共振器内のレーザー光形状の設計に不一致が見られ、計算モデルに問題があると考えられる。

平成25年度後半はこれらの原因追求と対処方法の確立についての検討に重点を置いた。これと並行して、平成26年度に蓄積率を1桁向上することを目標として、広島大学において共振器制御技術を開発するための設備の構築を行った。

③-3.2 鏡上の熱損失

現在、共振器に装着している鏡は REO 社製の反射率 99.9% 1 枚、および、99.99% 3 枚である。また、REO 社の仕様では、鏡上の損失は 10 ppm である。しかし、観測された鏡の変形および、別途測定した、レーザーの入射強度、蓄積強度の収支は、100 ppm 程度の損失を示唆している。共振器作製と調整の過程において、鏡が汚染された可能性が高い。通常レーザー装置や精密光学機器はクリーンルームなどの清浄な環境で取り扱うが、現在共振器が設置されている加速器施設はそのような環境を構築していない。そこで、共振器周辺、特に鏡の近傍を清浄な状態に保った上で作業をする環境の構築、および、共振器を設置する真空容器を清浄な環境下にて作業できるように改造した。また、汚染された鏡を再度清浄化する方法も試みた。③-図 11 は薬品(Fast Contact) を用いて鏡の清浄作業を行っているところである。損失が 60 ppm の鏡を同薬品で清浄化した場合、損失は 30 ppm となり、一定の改善がみられた。

これらと並行して、光学機器作製会社より購入可能な高反射率鏡の性能を我々自身で評価し、適切なものを選択、使用することを考慮している。国立天文台の重力波グループの協力により、REO 社より購入した高反射率鏡の散乱測定を行った。その結果、仕様において 10 ppm 以下の損失の鏡においても、それ以上の損失がある鏡が多いことが判明し、商用製品購入後我々自身で測定選択することが重要であることが分かった。市場調査の一環として、新たに米国 ATFilm 社より高反射率鏡を購入した。今後これの損失を測定する予定である。



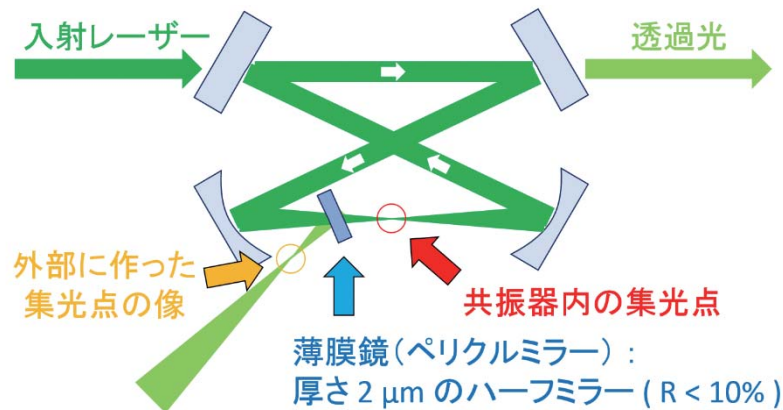
③-図 11. 薬品による鏡洗浄の様子。左図は薬品(瓶)と薬品を塗布する前の鏡。右図は薬品を塗布した様子。この後、乾いた薬品をはがすことによって、鏡表面の汚染物を除去する。

③-3.3 共振器内部のレーザー光伝搬の調査

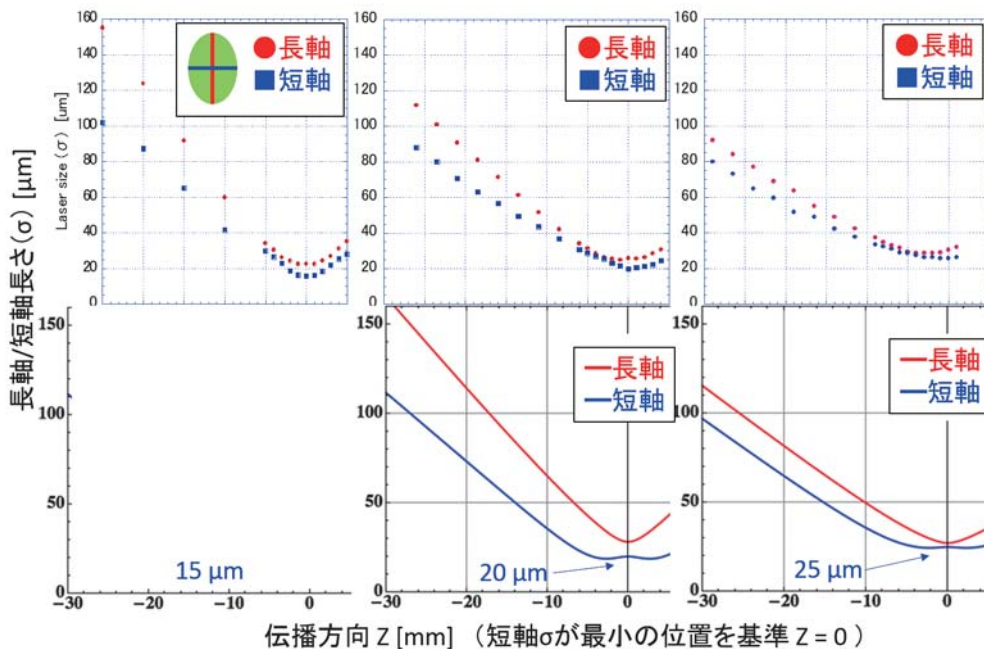
前述のように、③-図 10 に示したレーザー光の形状は共振器の外部による測定である。この共振器はレーザー光と電子の衝突点でレーザー光が円形になるように設計したが、測定はそれと異なっている。これに起因して、共振器に入射するレーザー光と共振器内部を伝搬するレーザー光の形状の不一致による、入射効率の悪化が懸念される。このことから、共振器内のレーザー蓄積強度を向上し、さらに目的である平均 1 MW の蓄積強度を目指すためには、共振器内におけるレーザー光の状態を把握することが重要となる。

共振器内の集光点付近の形状を系統的に調査するめ、薄膜鏡（ペリクルミラー）を共振器内に挿入し、レーザー光の一部を外部に取り出した。これによって集光点付近の鏡像を測定することができる。（③-図 12 参照）

③-図 13 は、集光点における集光サイズを変化させた場合の、集光点付近の形状の変化である。15 μm に集光した場合は像が楕円系になっている。集光サイズが大きくなるにつれて像が円形に近づいていることも分かった。③-図 13 には本共振器の設計に用いた伝搬行列法による計算も示している。計算では測定で得られた一番小さなサイズは実現できないという結果であった。現在、計算方法の再検討を行っている。その一方で、集光サイズを 25 μm 程度まで大きくすれば、形状はほぼ円形となり、また計算結果との乖離も減少する。このことから、共振器内で限界ま



③-図 12. 薄膜鏡（ペリクルミラー）を用いた、共振器内部のレーザー光形状測定。共振器の共鳴状態を保持したまま、集光点近傍の像を外部で測定できる。



③-図 13. 薄膜鏡で測定した。共振器内部のレーザー形状。上図は測定結果。左からレーザー光の最小軸長さ、15 μm 、20 μm 、25 μm 。下図は、共振器設計に用いた計算モデルによる予想。計算では 15 μm は安定に実現できなかったが、実測では可能であった。またレーザー光サイズが小さい時、レーザー光の形状は楕円形だが、大きくなると円形に近づき、計算との相違が小さくなっている。

で集光しなければ、現実的に妥当なパラメータの設定は可能と考えられる。また実験的な観点からは、共振器の共鳴状態を保持した状態においてその内部の状況を観測する方法を確立した。3次元4枚鏡共振器内のレーザー光の伝搬をここまで系統的に調査した例はなく、光共振器開発のための貴重なデータを取得できたと考えている。

③-3.4 広島大学における共振器制御開発設備の構築

KEKにおける光子生成実験と平行して、レーザー蓄積共振器の性能向上のための技術開発をおこなうため、広島大学においてその設備の構築を行った。その目的は共振器制御技術の開発、特にデジタルフィードバック技術を念頭に置いている。そのために、3次元4枚鏡共振器を新たに作製した。(③-図14参照。)



③-図14. 広島大学における、共振器制御技術開発のために作製した3次元4枚鏡共振器。この後、クリーンルームに設置するため、保護のビニールがかけられている。

また前項で述べた、精密光学機器の取り扱いのための、クリーン環境の構築を行っている。広島大学のレーザー実験室は清浄空気循環、温度湿度調整機構を備えているが、本研究で使用を想定している高反射鏡の取り扱いにはまだ不十分である。そのため、レーザー蓄積共振器の設置場所周辺をさらに清浄化し、鏡周辺でクラス100程度の清浄環境を構築するための設備設計と機器の購入を行った。

③-4 平成25年度のまとめ

H25年度は、マルチアルカリカソード蒸着試験装置の製作、カソード生成試験、寿命試験を開始した。7%を超える量子効率(473nm)を実現し、また高い時間耐久性をもつことを示した。

本委託業務前までの研究開発をもとに、光蓄積共振器を用いた光子生成について一定の成果をとりまとめた。また、その過程で本委託業務の目標を達成するため課題を明確にして、その原因と解決を追求した。平成25年度にレーザー蓄積強度の向上および、制御技術の検討を行った。前項に上げた課題への対応が必須であること分かり、これを優先した。課題の原因究明はほぼ完了して、蓄積率向上に向けた指針は得られた。平成26年度にはレーザー蓄積強度増大の試験ができると考えられる。

④ スポーク型超伝導空洞と高量子効率カソードの開発

(再委託先：独立行政法人日本原子力研究開発機構)

概 要

スポーク空洞は、空洞間隔を短くできることや、マイクロフォニクスによる空洞周波数の変動も小さいこと、セル間のカップリングが強く電界分布調整が容易なことなど ERL 加速器として用いる場合に利点が多い。そこで平成 25 年度は、参画機関である国立大学法人京都大学と協力して 4 K で高電界加速運転可能な 325 MHz 新超伝導空洞開発を進めた。計算機シミュレーションにより、スポーク空洞本体、および、高次モード (HOM) カップラーの最適設計例を得た。ニオブ材料を調達し、スポーク空洞の製作に必要な加工時における塑性変形を計算機シミュレーションで確認した。既存施設において、325 MHz 空洞の性能測定が行えるよう、必要な装置として半導体アンプ、真空装置を整備した。これら成果について以下に詳しく述べる。

小型高輝度 X 線源イメージング基盤技術開発の要素技術として、高量子効率カソードの研究開発を進め、既存の分子線エピタキシー成膜装置 (MBE) を高量子効率カソード成膜装置に改造するため、25 年度は成膜装置の設計を行い、必要な部品であるタングステンヒーター、回転導入機等を調達した。さらに、カソードの大電流試験装置として、成膜装置と電子銃を統合した装置の設計を行った。成膜したカソードを電子銃に装着すると同時に、高電圧印加に適した表面電界とするためカソード電極の再設計も行った。

④-1 スポーク空洞の開発

④-1.1 スポーク空洞形状の最適化設計

スポーク空洞を超伝導加速器として用いる場合、加速電界は最大電界または最大磁界により制限されるため、最大電界と最大磁界をできるだけ小さくするような形状にする必要がある。国際リニアコライダー計画 (以下、ILC という。) などに用いられる楕円空洞に比べて、スポーク空洞は形状が複雑であるため、空洞形状を決めるためのパラメータも多く、さらに最適化すべき評価関数も複数ある。そこで、遺伝的アルゴリズムを用いてスポーク空洞形状の多目的最適化計算を行った。

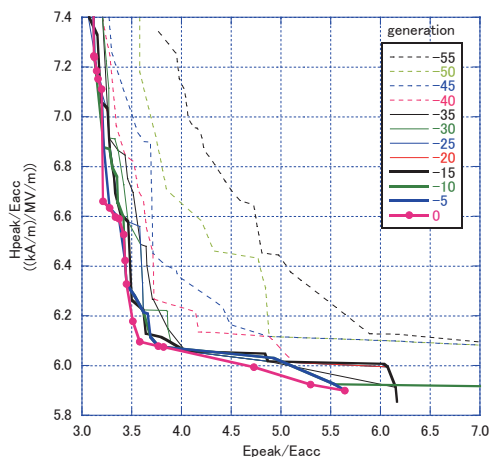
遺伝的アルゴリズムは、ある計算結果集団の中から評価関数の優れた個体を選んで親集団とし、この親集団の中の個体を組み合わせて新しいパラメータ集合 (子集団) を作成して計算を行う。このように親集団から子集団へと計算を繰り返す、世代を経るに従って評価関数の優れた個体が生き残っていくことにより最適解を探索する手法である。ただし、評価関数の優れた個体のみでは必ずしも好ましくないため、全体の中から評価関数に応じた確率による個体の選択や、個体のパラメータの一部を違うものに変化させる突然変異といわれる操作も組み合わせて行われる。

評価関数としては最大電界と加速電界の比 (E_{peak}/E_{acc})、最大磁界と加速電界の比 (H_{peak}/E_{acc}) を用い、各個体の評価方法としてパレートランキング法といわれる手法を用いた。パレートランキング法とは評価関数の値の大小で評価するのではなく、すべての評価関数について自

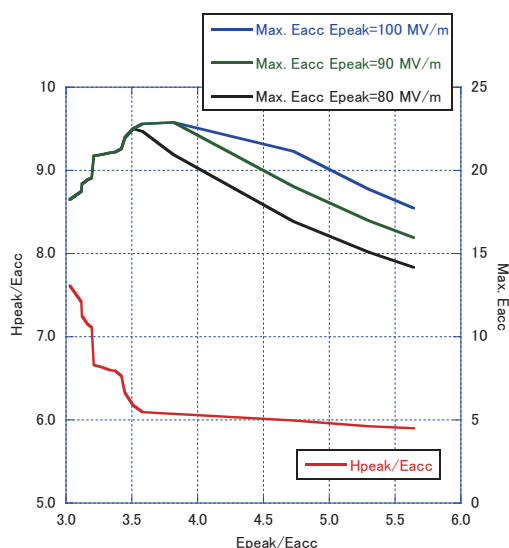
身より優れた個体がいくつ存在するかでランキングを決めるものである。もし自身より優れた個体がなければランキングは1（最高評価）となり、パレートフロント（最適解の集まり）に近いものほど高評価になる。

Epeak/Eacc と Hpeak/Eacc 空間において各世代を経るごとのパレートフロントの推移を④-図1に示す。世代が進むにしたがって、パレートフロントが左下方向に推移して改善されているが、現世代あたりではパレートフロントがあまり推移せず、ほぼ収束してきていることがわかる。

パレートフロントはどれも最適解であるが、最大加速電界を考慮すると、最適解はさらに絞られる。これまで数多くの超伝導加速器が製作されてきたが、これらの結果によると、超伝導状態を保持できる磁界の最大値は 139 kA/m であり、電界の最大値は 80 ~ 100 MV/m になっている。この値を用いてパレートフロントに対するスポーク空洞の最大加速電界を求めると、④-図2のようになる。Epeak/Eacc が低いときは磁界が制限となるが、Epeak/Eacc が高いときは電界が制限となっている。加速電界が最大になるのは Epeak/Eacc が ~ 3.7 のときで、最大加速電界は 22 MV/m である。



④-図1. スポーク空洞形状の遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化計算によるパレートフロントの世代ごとの推移。“0”が現世代で5世代前ごとにプロットされている。



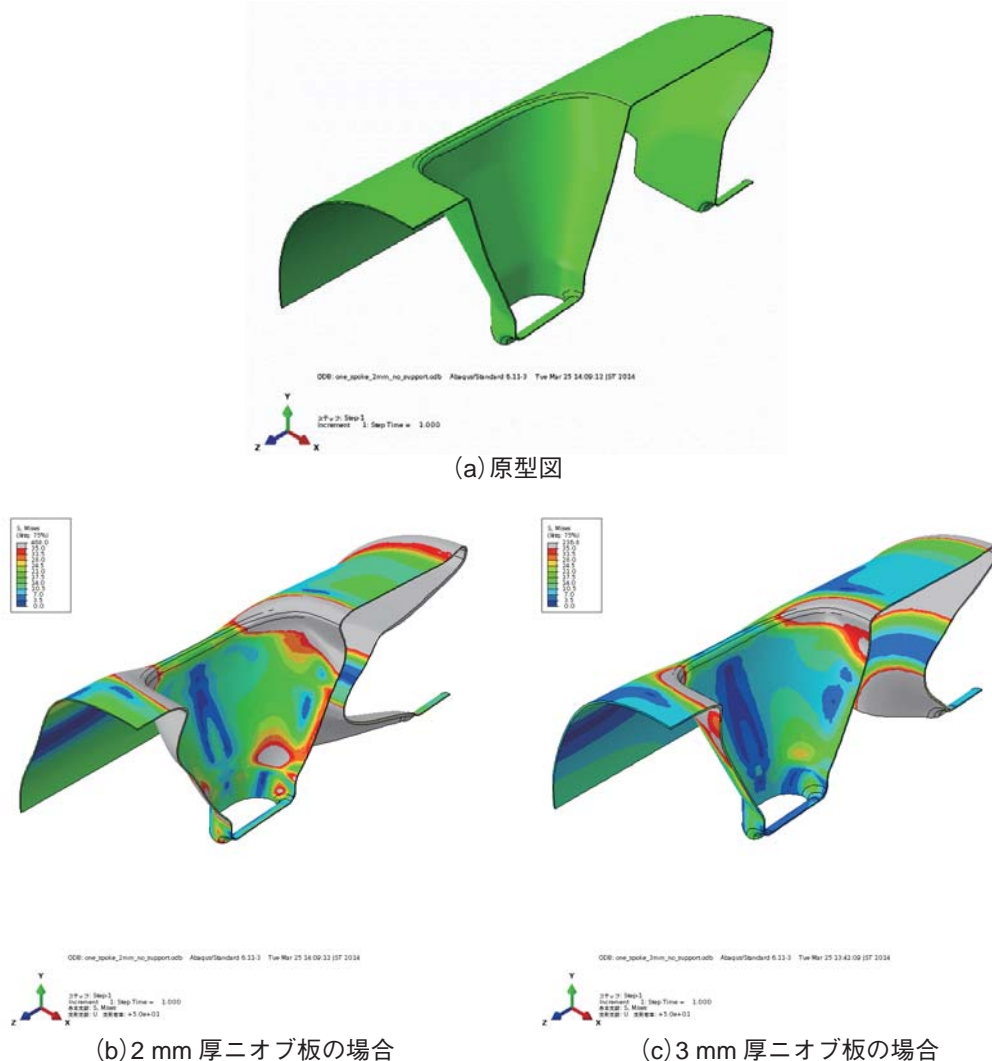
④-図2. パレートフロントと Epeak/Eacc に対する最大加速電界。

④-1.2 スポーク空洞の機械強度設計

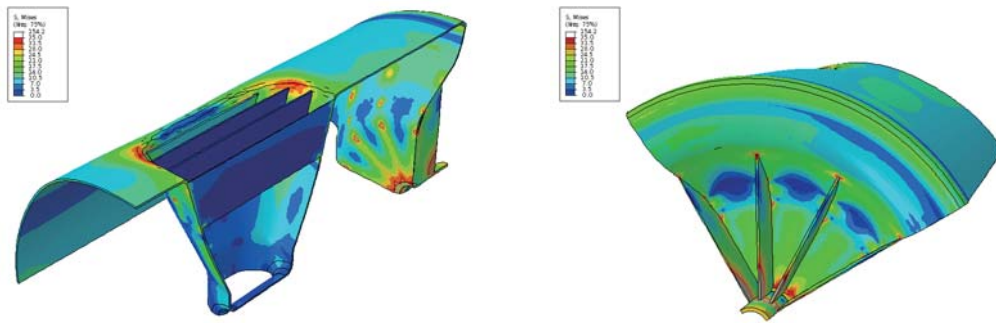
最適化計算によって得られたスポーク空洞形状に関して、構造解析ソフト ABAQUS を用いてニオブ製のスポーク空洞を製作するのに必要な強度計算を行った。最初にニオブ板の厚さを変えて真空耐圧でのミーゼス応力を計算した結果を④-図3に示す。応力のカラー部分は 35 MPa 以下を示しており、ニオブの0.2%耐力35 MPaに相当する。また変形量は50倍に拡大されている。2 mm 厚のニオブ材の場合は 0.2% 耐力以上の部分が多く、スポークの端部分や端板部分に大きな変形が見られるが、3 mm 厚にすると大幅に改善される。

端板部分とスポークの付け根付近にまだ大きな応力が残っているため、端板には放射状のサポートを12枚均等に入れ、スポークの付け根にはビーム軸方向に7枚のサポート板を付けた形状で計算を行った結果を④-図4に示す。応力も軽減されており、ほぼ全体で0.2%耐力以下になっており、大きな変形も見られない。

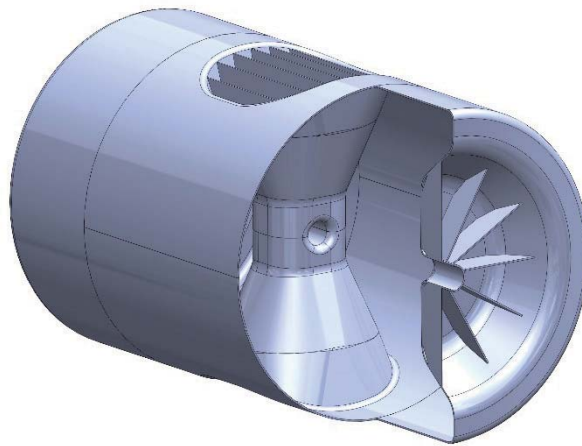
これらの結果を基にしたスポーク空洞の概観図を④-図5に、主なパラメータを④-表1に示す。



④-図3. 真空耐圧によるスポーク空洞の変形図とミーゼス応力分布 (a)原型図 (b)2 mm 厚ニオブ板の場合 (c)3 mm 厚ニオブ板の場合



④-図 4. サポート板を取付けたスポーク空洞の真空耐圧でのミーゼス応力の分布 (a)全体 (b)端板付近



④-図 5. スポーク空洞概略図

④-表 1. スポーク空洞寸法

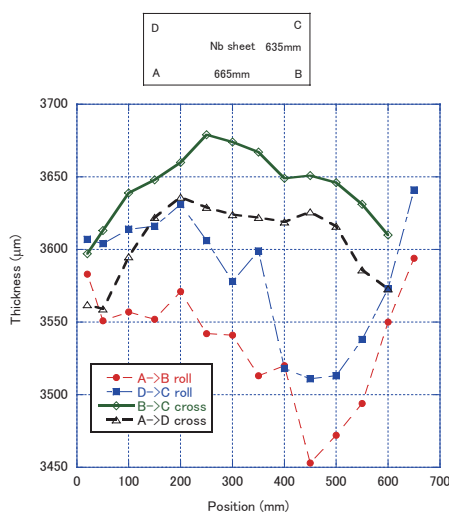
| | |
|-----------|---------|
| 周波数 | 325 MHz |
| タンク 直径 | 608 mm |
| タンク 長さ | 922 mm |
| スポーク中央 幅 | 162 mm |
| スポーク中央 厚さ | 139 mm |
| スポーク端 幅 | 319 mm |
| スポーク端 厚さ | 319 mm |

④-1.3 ニオブシートの基礎データ

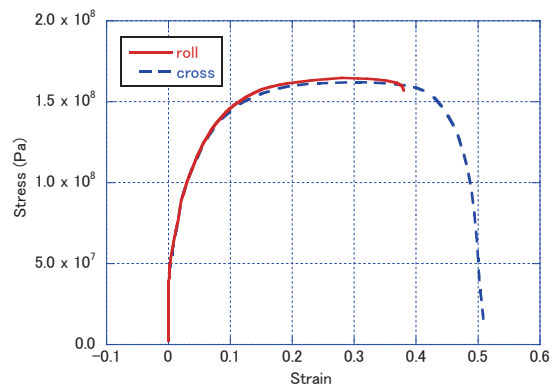
スポーク形状を成型するための金型を設計するには、加工するニオブシートの伸びやスプリングバックなどを考慮する必要がある。またニオブシートの板厚誤差なども成型精度に影響をもたらす。そこで金型設計に必要な弾性変形域から塑性変形域にわたるデータを取得するため、ニオブシートを購入した。ニオブシートは精製する過程により特性も変動するため、実際に加工するニオブシートでのデータが必要である。

板厚精度の測定データを④-図6に示す。ニオブシートのロール方向はA → D、B → C方向であり、ロール方向に関しては中央が少し厚くなっており、ロール方向で最大0.14 mm、クロス方向で最大0.08 mmの誤差がある。また応力-ひずみ曲線のデータを④-図7に示す。ニオブシートのロール方向とそのクロス方向でわずかな違いはあるが、ほぼ同じ特性とみなすことができる。

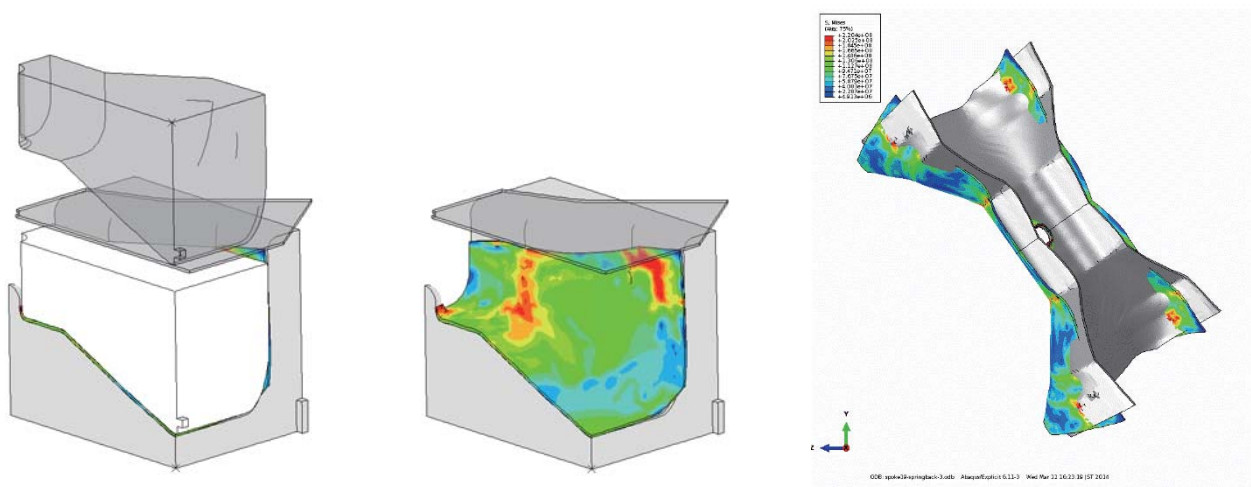
これらのデータをもとに構造解析ソフト ABAQUS を用いて、スポーク形状の金型成型によるニオブシートの塑性変形計算を行った。④-図8のようなスポークの1/8モデルで計算を行い、ニオブシートを上パンチで下のダイに押し付けることでスポーク形状に塑性変形させることができるが、このままではスプリングバックが大きいことが分かった。



④-図6. ニオブシートの厚さ分布



④-図7. ニオブシートの応力-ひずみ曲線



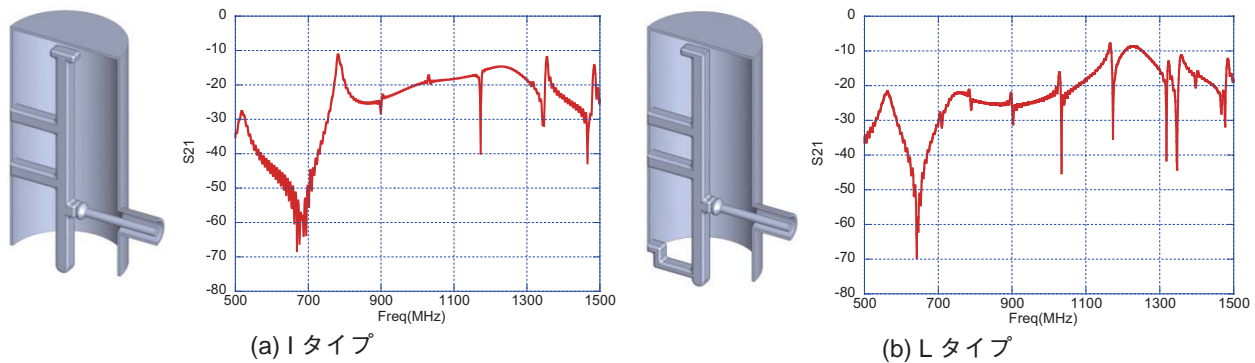
④-図8. （左、中）ニオブシートの金型成型の例、（右）スプリングバック：灰色は設計形状、カラーはスプリングバック後の形状。

④-1.4 HOM カップラーの設計

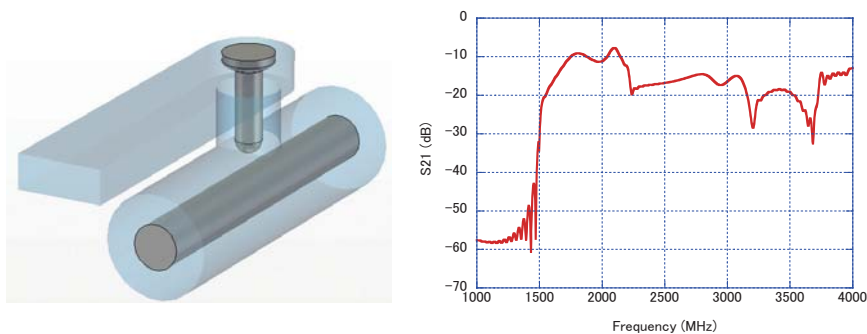
スポーク空洞を超伝導加速器として使用する場合には、HOM（高次モード）を減衰させる機構が必要になるが、スポーク空洞の場合ビームパイプが細くビームラインダンパーは使えないため、空洞側面に HOM カップラーを取付けることとなる。

楕円空洞で使用されている HOM カップラーと同等の形状のものについて 650 MHz を加速周波数として透過係数を計算した結果を④-図 9 に示す。325 MHz で用いるときは形状を 2 倍の寸法にすればよい。I タイプ、L タイプとも加速周波数に対しては透過係数が急峻な低下を示しており、加速周波数を超えると急激な立ち上がりを示し、高い周波数において -20 dB 以上程度の透過率を達成している。

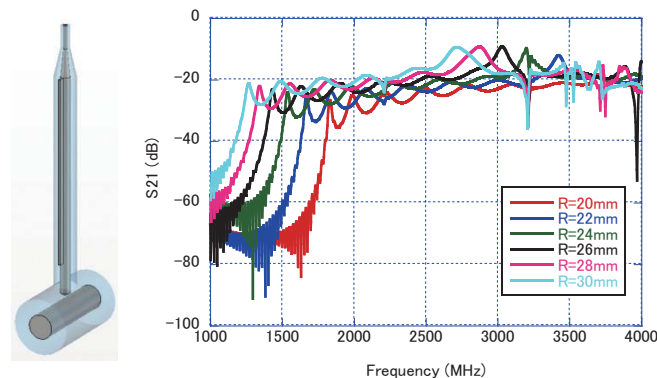
さらにこれらの結果をもとに 2 つの新しいタイプの HOM カップラーを設計した。1 つは④-図 10 のような同軸管と導波管を組み合わせた同軸-導波管型 HOM カップラーで、もう 1 つは④-図 11 のように同軸の内軸と外軸の間に仕切り板を挿入した導波管（C 形導波管と名付けた）を用いる同軸-C 形導波管型 HOM カップラーである。どちらも導波管がもつ遮断周波数を利用したもので、加速モードと HOM を分離することができる。



④-図 9. I タイプと L タイプの HOM カップラーの形状と透過係数



④-図 10. 同軸-導波管型 HOM カップラーの形状と透過係数



④-図 11. 同軸-C形導波管型 HOM カップラーの形状と透過係数。外径を変えると導波管断面の平均周長が変わり、遮断周波数を変えることができる。

④-1.5 スポーク空洞性能試験準備

スポーク空洞の性能試験を行うために必要な機器を整備した。高周波系としては 325 MHz 半導体アンプや RF スイッチや減衰器などの高周波部品を購入し、高周波試験の準備を始めた。4k 運転可能な超伝導空洞として 325 MHz 空洞の設計を進めている。実用性に関する検討も含めた詳細設計は、平成 26 年度以降になる。

また真空系としては、イオンポンプや、ターボ分子ポンプ、スクロールポンプなどの排気系、さらに真空度を測定するためのコールドカソードゲージやピラニゲージなどの真空計測系を購入し、真空試験の準備を始めた。

④-2 高量子効率カソードの開発

小型高輝度 X 線源では、要求される高輝度性能を実現するため光カソードをレーザーで駆動するタイプの電子銃が用いられる。この光カソード電子銃を長時間実用運転するには、光カソードの高量子効率化と共に長寿命化が必須である。このような光カソードとして、近年マルチアルカリカソードが注目されている。マルチアルカリカソードは光電子増倍管で広く使われているが、ガリウムヒ素カソードに比べて低エミッタンス化が難しいとされ、電子銃に採用される例は稀であった。ところが、近年エミッタンス性能だけでなく、高量子効率や高速応答性がカソードに求められている。そのため、低エミッタンス化に適した 800 nm 波長の赤色レーザーでなく、高量子効率、高速応答性に適した 500 nm 近傍の緑色レーザーで光カソードを駆動することが一般的になっている。加えて負親和性表面を持つガリウムヒ素よりも、正親和性表面を持つマルチアルカリカソードが寿命性能に優れているとされ、マルチアルカリカソードに対する期待が高まっている。

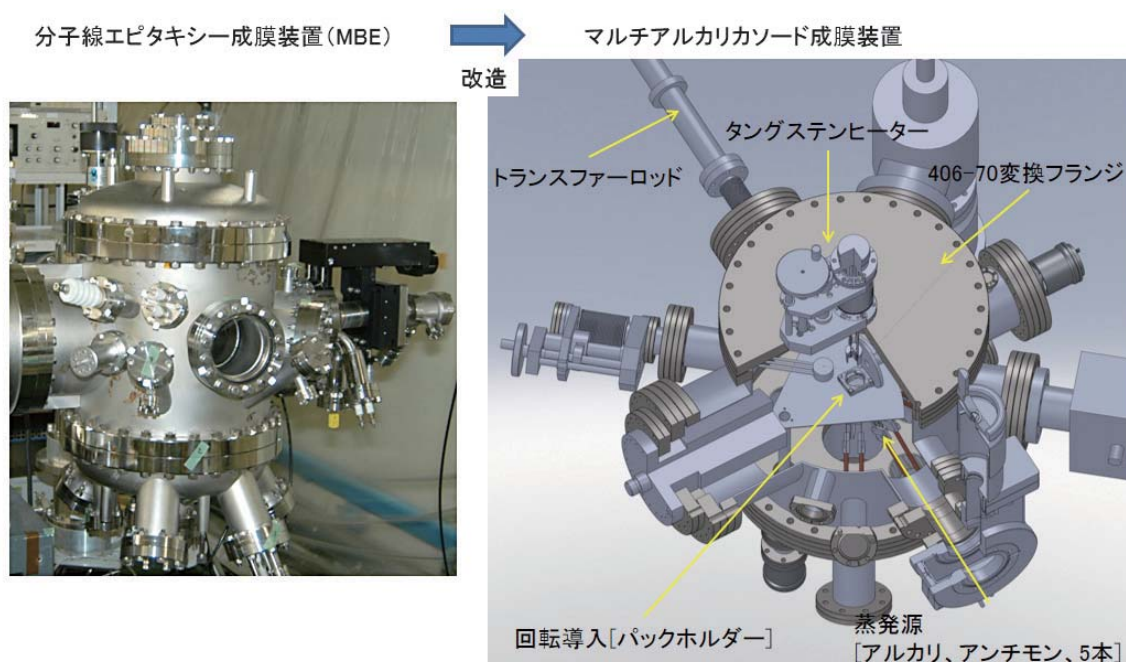
我々は、ガリウムヒ素カソードを用いた光カソード直流電子銃の開発実績を持ち、これまでに世界初の 500 keV 電子ビームの生成、10 mA 電子ビームの生成を実現してきた。さらに、次世代エネルギー回収リニアック (ERL) 放射光源のための試験加速器である KEK のコンパクト ERL (cERL) に電子銃を移設して、安定な電子ビーム供給を実現した。これにより、cERL の

順調な試験運転に大きく貢献してきた。

本研究開発においては、JAEA はカソードの高量子効率化に関する系統的な研究開発を推進する。そのため、JAEA に既存の分子線エピタキシー成膜装置(MBE)を改造して、高量子効率・長寿命マルチアルカリカソード成膜装置を実現する。本成膜装置を JAEA に既存の 250kV-50mA 光カソード電子銃と統合し、実際の環境下でビーム生成を行い、成膜した光カソードの高効率・長寿命性能試験装置とする。平成 25 年度はマルチアルカリカソード成膜装置の実現に必要な環境であるタングステンヒーター、回転導入機等を調達した。また、成膜装置と電子源を接続して総合試験を行うための全体設計を行った。

④-2.1 マルチアルカリカソード成膜装置

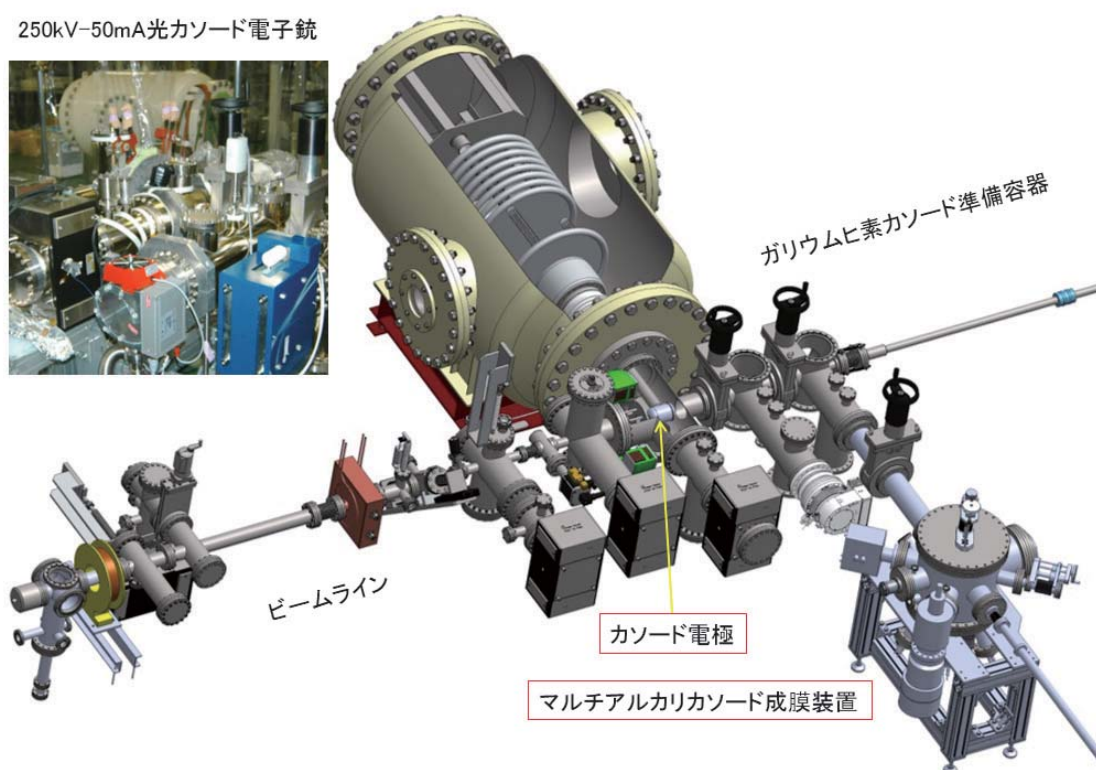
④-図 12 (左) に既存の分子線エピタキシー成膜装置 (MBE) を示す。この装置を改造して④-図 12 (右) に示すマルチアルカリカソード成膜装置を製作する。平成 25 年度は装置の設計、及び主要部品の調達を行った。5 本の蒸発源を用いて、様々なマルチアルカリカソードを成膜することができる。タングステンヒーターは成膜時のカソード面の温度調整に用いる。回転導入機付きパックホルダーとトランスファーロッドを用いて、成膜したマルチアルカリカソードを電子銃に移送できるように設計した。平成 25 年度に調達した主要部品は、トランスファーロッド、回転導入機、タングステンヒーターである。装置完成後は、カソードの性能測定を系統的に行っていきたい。



④-図 12. 既存の分子線エピタキシー成膜装置 (左) を改造してマルチアルカリカソード成膜装置 (右) を製作する。

④-2.2 高量子効率・長寿命性能試験のための電子銃全体設計

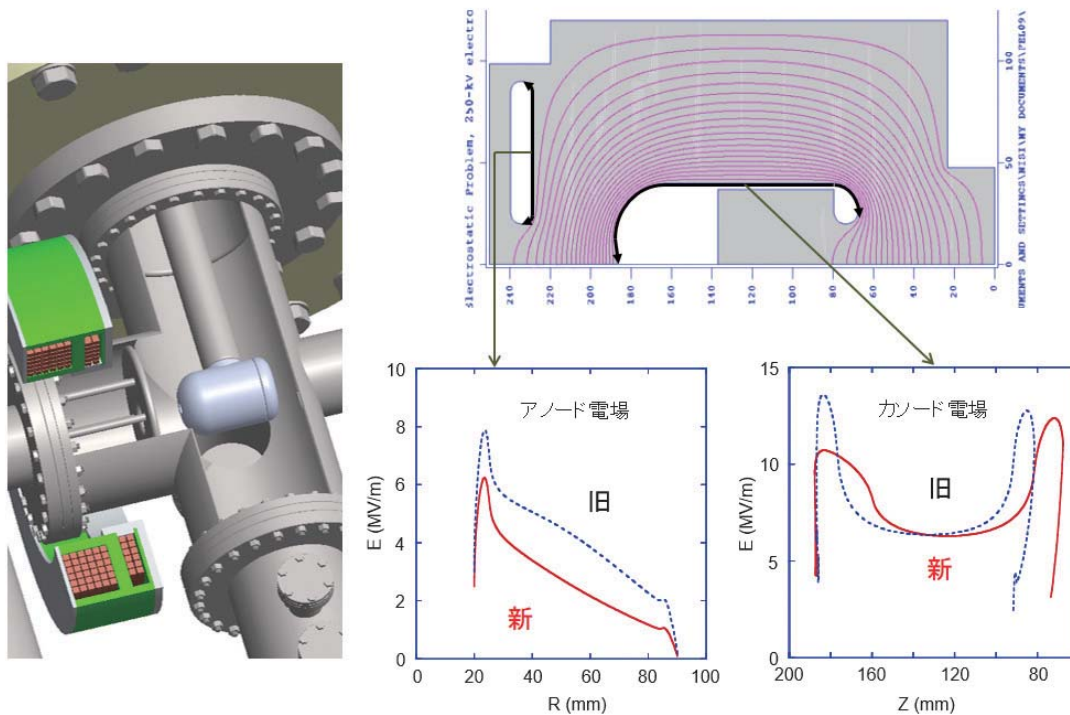
成膜したマルチアルカリカソードの高効率・長寿命性能試験を行うため、250kV-50mA 光カソード電子銃とマルチアルカリカソード成膜装置を統合する。全体設計を④-図 13 に示す。トランスファーロードを用いて既存のガリウムヒ素カソード準備容器に成膜したカソードを移送し、電子銃電極に組み込む。既存の電子銃ビームラインを用いて、実際にビーム生成をしながら成膜カソードの量子効率、寿命の試験を行う。平成 25 年度は装置の統合に関する全体設計を行った。



④-図 13. 250kV-50mA 光カソード電子銃とマルチアルカリカソード成膜装置の統合。マルチアルカリカソードを電子銃に取り付けられるように、カソード電極の再設計も行った。

④-2.3 カソード電極の設計

成膜したマルチアルカリカソードは、cERL と同じ規格のカソードパックを用いて各真空容器間を移送する。250 kV 電子銃のカソードパックと規格が異なることから、平成 25 年度はカソード電極の再設計を行った。従来の電極は、高電圧印加時に電界放出暗電流が発生することが問題となっていたため、電極の形状も再設計し、カソード、アノード電極共に表面電場が旧電極より低くなる解を見出した（④-図 14 参照）。



④-図 14. 新たに設計したカソード電極（左）。右上図は静電場計算結果で、右下図は電圧 250 kV の時のアノード電極とカソード電極の表面電場。新電極の表面電場は、旧電極に比べて小さい。

④-3 まとめ

スポーク空洞の最適形状をほぼ決定することができた。しかし、スポーク空洞は構造が複雑であるため、マルチパクタリング（⑨参照）が起こりやすい空洞である。そのため京都大学との協力でマルチパクタリングの解析を進め、その結果をもとに、空洞形状の微調整を行う予定である。

成型加工に必要なニオブシートの基礎データを得ることができ、成型加工のための計算を始めた。

超伝導加速器に必要な HOM カップラーの設計も合わせて行い、必要な性能特性を持つ形状を求めることができた。

既存施設において、325 MHz 空洞の性能測定が行えるよう、必要な装置として半導体アンプ、真空装置を整備した。

⑤ 小型高輝度 X 線源を用いた X 線イメージング装置の基盤技術開発

(再委託先：株式会社リガク)

概 要

本プロジェクトは小型加速器を用いた小型高輝度 X 線源の開発、およびその線源を用いた応用技術の一つとして X 線イメージング装置の基盤技術開発を目指している。(株)リガクは、東北大学・多元物質科学研究所・百生敦教授のグループと共同で、後者の開発目標に寄与することが求められている。特に(株)リガクは、分析装置メーカーとしての立場を生かし、X 線イメージング装置の製品化技術の面で寄与が求められている。

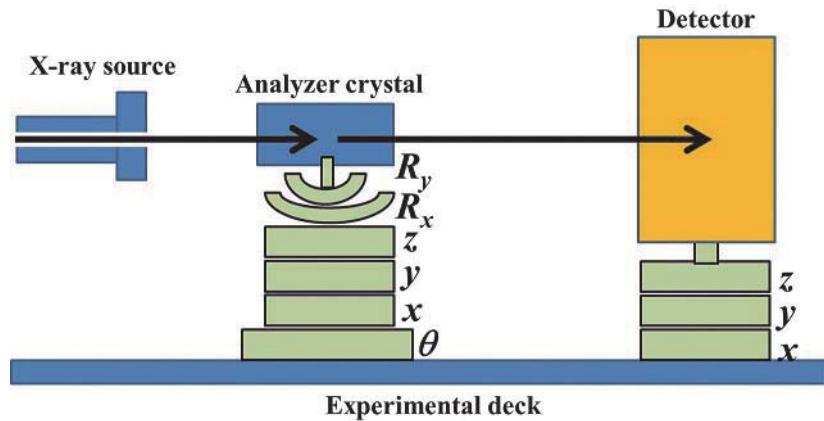
本プロジェクトで開発予定のイメージング技術は、像のコントラストをより明瞭に際立たせるため、百生教授グループ開発による Talbot 干渉計の手法を用いることとしている。(株)リガクは、①小型高輝度 X 線源から出射される X 線の特性評価、および②イメージング技術の実用化に向けた技術装置の製品化要素開発とその技術が活用されうる潜在市場に関しての調査、を進めることとしている。

平成 25 年度においては、X 線特性評価のための実験装置建設の一環として、分光装置の組み立て、検出器の調査と調達、および検出器の特性評価を行った。検出器に関しては、比較的低価格で大検出面積が得られる CMOS 検出器を採用するとともに、応用分野として考えうる方向に沿って市場の情報収集を開始した。

⑤-1 X 線特性評価のための分光装置の製作

X 線特性評価のための分光装置の構成を⑤-図 1 に示す。図の左手に X 線源 (X-ray source) がある。その下流にエネルギーを分別するための分光結晶 (Analyzer crystal) があり、更にその下流側に検出器 (Detector) がある。分光結晶は、6 軸モーター駆動のゴニオメータ (駿河精機株式会社製) で支えられている。このゴニオメータは、分光結晶の回転中心を、ゴニオメータ全体を回転させるための θ ステージ (⑤-図 1 の最下部) の回転軸に一致させるため、x 軸および y 軸ステージをもつ。このゴニオメータは、更に結晶の高さを調整するための z 軸ステージ、更に x 軸方向および y 軸方向における結晶の傾きを調整するための R_x 軸および R_y 軸ステージを持つ。一方、検出器は x 軸、y 軸および z 軸ステージからなる 3 軸モーター駆動のゴニオメータ上に設置した。

X 線は図の左端にある X 線源から右方向に出射され、分光結晶に角度 θ_0 で入射する。この X 線は結晶面 (結晶面間隔 d) で、Bragg の条件 ($2d \sin \theta_0 = 12.39854/E_0$) を満たすエネルギー成分 E_0 のみが反射され、分光される。分光された X 線は検出器に入射し、その強度が計測される。分光結晶を θ 軸ステージによって断続的に回転させ、個々の θ_0 におけるエネルギー E_0 での X 線強度を計測することにより、横軸にエネルギー (E)、縦軸に強度 (I) の分布図を得ることができる。この様にして、小型高輝度 X 線源のエネルギー分布特性を評価した。



⑤-図 1. X線特性評価用実験装置模式図

⑤-2 検出器の選定と評価

⑤-2.1 検出器の選定

本課題では、検出器を X 線の特性評価および X 線イメージング実験に使用する。X 線イメージングには一般に二次元検出器が使用される。現在、二次元検出器には様々な種類のものが市場に出回っているが、それらは大別して photon-counting type と photon-integrating type に大別される。

Photon-counting type の検出器とは、検出面に二次元的に配列されたピクセル（あるいはピクセルに相当する微小面積内）に入射してきた X 線フォトンの一つずつ数え上げるものである。検出部（センサー）が Si の様な半導体から構成された半導体検出器では、ピクセルに入射した X 線フォトン、それに伴って電子・正孔対を発生させ、電子塊はセンサーの両面に印加された電場によって加速され、電気信号（電圧パルス）に変換される。その電気信号は前置増幅器（pre-amplifier）、エネルギー分別器（energy discriminator）を通過し、計数器（counter）によって数え上げられる。

Photon-integrating type の検出器は、入射した X 線によって発生した電子塊をピクセル内の well に一定の時間間隔で貯め込み、その時間間隔ごとにその well から電気信号（電圧パルス）を出力するものである。よって、その信号は、その時間間隔において飛び込んだ X 線パルスによって発生した全電子を積算（integration）したものとなる。しかし、同時にノイズ信号も積算されるため、photon-counting type の検出器に比較して、特に信号が弱い時に S/N の低下が引き起こされる。

Photon-integrating type の検出器として、代表的なものに CCD 検出器と CMOS 検出器がある。両者とも、一般にセンサー面に蛍光体膜を持ち、入射した X 線フォトンはその蛍光体によって一度光に変換され、蛍光体の下流側にあるフォトダイオードによって電気信号に変換される。前者は、いわゆるバケツリレー方式で電荷を順次送り出すもので、その結果、読み出し時に信号掃き出しまでの間、検出できない時間帯が生じる。一方、後者は随時読み出しができ、また passive type と active type があり、active type はピクセル毎に増幅器を持ち、passive type に比べて S/N が改善されている。

これら検出器の特徴を⑤-表 1 に比較して示す。

⑤-表 1. 代表的二次元検出器の特徴の比較

| | Photon-integrating type | | Photon-counting type | |
|-------------------|-------------------------|---------------|------------------------|--------------|
| | CCD detector | CMOS detector | Semiconductor detector | Gas detector |
| Sensitivity | ◎ | ○ | ◎ | ◎ |
| Dynamic range | △ | △ | ◎ | ○ |
| S/N | ○ | △ | ◎ | ◎ |
| Energy resolution | × | × | ◎ | ◎ |
| Data quality | ○ | ○ | ◎ | △ |
| Active area size | ○ | ◎ | △ | ○ |
| Multiple module | ○ | ◎ | ○ | △ |
| Pulse X-ray | ○ | ○ | × | × |
| Cost | △ | ○ | △ | ○ |

注) 異なった構造をもつ EM-CCD のように、photon-counting のできる CCD 検出器も存在する。

Photon-counting type の検出器は discriminator を装備しているため、エネルギーを分別できる利点を持つ。しかし、本プロジェクトで扱う高輝度 X 光源のように、短い発光時間に多数の X 線フォトンが入射するパルス X 線の場合、検出器が特性として不感時間を持つため、全 X 線フォトン数を数えきれない場合が生じやすい。一方、photon-integrating type の検出器では、入射 X 線が弱い場合に感度が低いなどの短所を持つが、入射 X 線フォトン電荷としてキャパシターに一定時間貯め込むため、その間での数え落としが発生しない。そのため、高輝度パルス X 線を扱う X 線自由電子レーザー (XFEL) の場合でも、photon-integrating type の検出器が使用されるケースが多い。

以上のような理由から、本プロジェクトでは、X 線源の特性評価および将来のイメージング実験の両方に使用できる検出器として、二次元の photon-integrating type の検出器を使用することとした。また、通常構造の CCD 検出器の場合は、データの読み出しにあたってシャッターを閉じ、X 線の入射を遮らなければならないが、CMOS 検出器の場合は随時読み出しができる。以上の様な理由から、本プロジェクトでは二次元 CMOS 検出器を使用することとし、実際には RAYANCE 社製の CMOS 検出器を採用することとした。

RAYANCE 社製 CMOS 検出器 (1215CF-MP) の外観図を⑤-図 2 に示す。また、主要な仕様緒元を⑤-表 2 に与える。なお、この検出器を採用するにあたっては、事前に性能を調査した上で採用を決定した。その内容は、⑤-2.2 性能評価の項に記載する。



⑤-図 2. 実験で採用した CMOS 検出器 (RAYENCE, 1215CF-MP)。

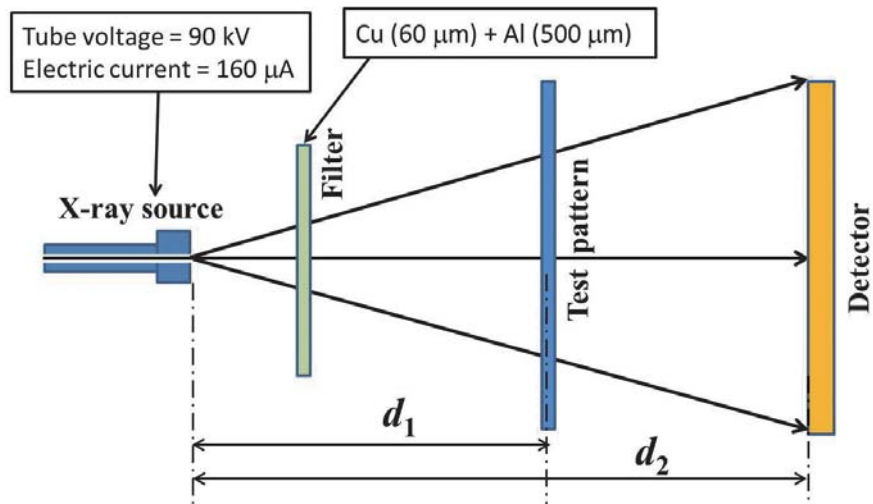
⑤-表 2. CMOS 検出器 (RAYENCE, 1215CF-MP) の主な仕様

| | |
|------------------------|---|
| Scintillator | Gd2O2S:Tb or CsI:TL |
| Active area | 116.4 × 145.7 mm ² |
| Pixel pitch | 49.5 / 99.0 / 198.0 μm |
| Active pixels | 2,352 × 2,944 / 1,176 × 1,472 / 588 × 736 |
| Limiting resolution | 10.0 lp/mm |
| A/D conversion | 14 bits |
| Frame rate | 7 / 28 / 60 frame/s |
| Interface | Camera Link / USB 3.0 (option) |
| Energy range | 40 – 90 kV |
| Dimensions (W × L × H) | 229 × 159 × 26 mm ³ |
| Weight | 1.64 kg |

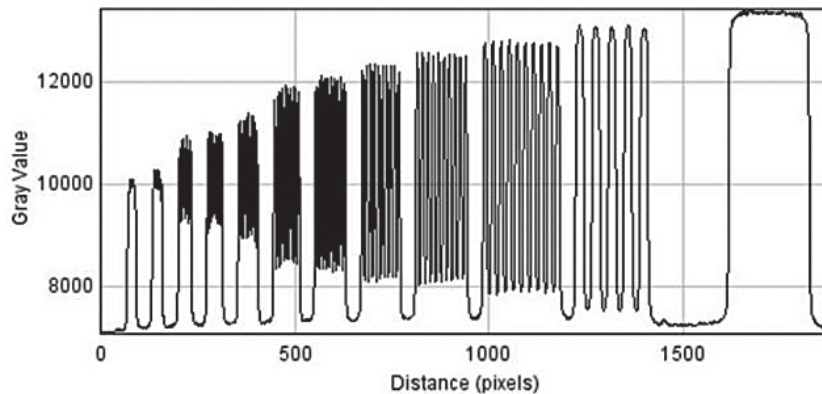
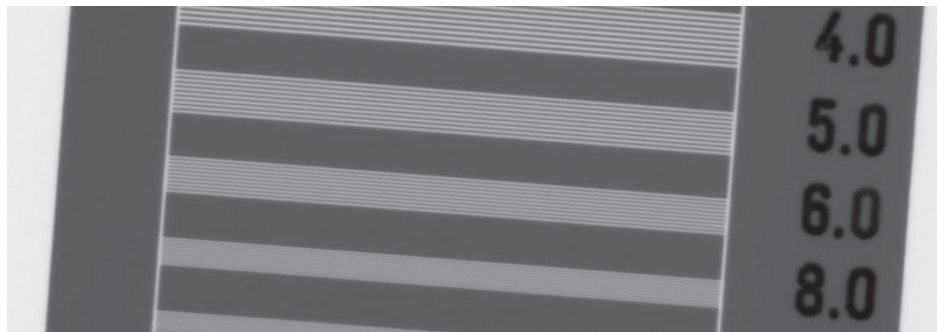
⑤-2.2 検出器の評価

実験室用の X 線源を用いて上述の検出器を評価した。その時の実験の図式を、X 線源の運用条件とともに、⑤-図 3 に示す。検出器を比較評価するため、X 線源には浜松ホトニクス社製のマイクロフォーカス X 線源 L10101 (焦点径 5 μm) を用いた。また、検出器に関しては、RAYENCE 社製 CMOS 検出器以外に、同じく比較のため、Dexela 社製の CMOS 検出器を用いた。図中のフィルターは、低エネルギー側の X 線を除去するためのものである。

検出器の空間分解能を調査するための test pattern を、 $d_2 / d_1 = 1$ および 5 の距離に設置して、そのイメージを撮影した。その時に得られたイメージの例を⑤-図 4 に示す。それぞれの X 線

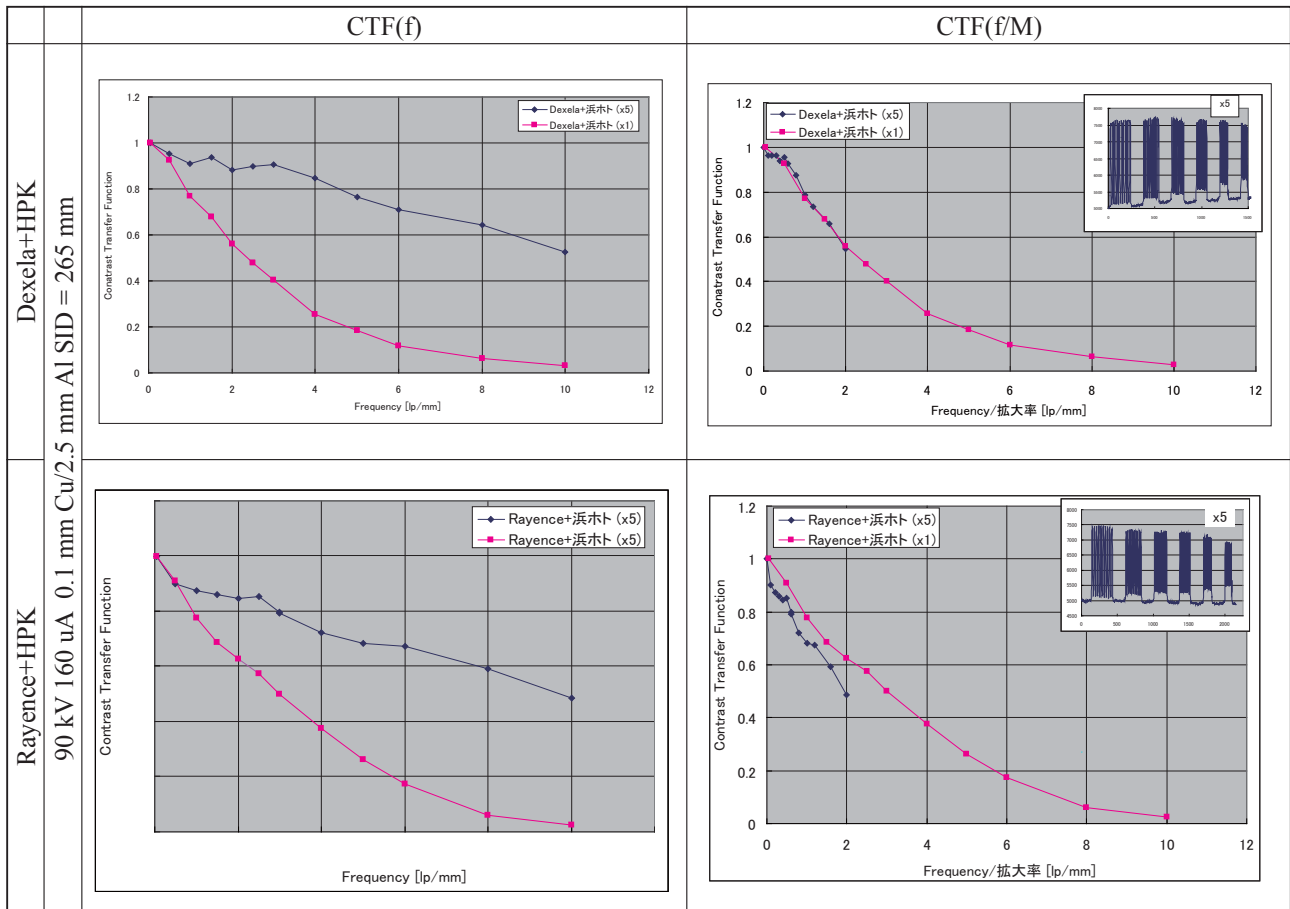


⑤-図 3. 検出器評価における実験の図



⑤-図 4. 実験によって得られた Test pattern のイメージ（上図）。下図はその断面を切り出したもの。

源と検出器とを組み合わせ得られた CTF (Contrast Transfer Function) 値を横軸 frequency (lp/mm) に対してプロットしたものを⑤-図 5 に示す。ちなみに、CTF とは visibility を表すもので、CTF = 1.0 において 100% 見えることを意味する。CTF 性能の調査はラボ用の X 線発生装置を用いて、検出感度、分解能などを実際に測定して選定した。これら実験による評価結果は、RAYENCE の CMOS 検出器が空間分解能、コスト等の総合的な評価において有利であることを示した。



⑤-図 5. 各種測定条件下における CTF 値のプロット。

RAYANCE 社が独自に CMOS を開発、製作していること、画素のサイズが 50 μm であること。マンモグラフィー用途として、医療用に使用されている。製品として実績があることが選定の理由であり、Dexela 社製はピクセルサイズが 75 μm である為、分解能の点で劣り、また Dexela 社製は素子間のつなぎ目がある為、画像測定、CT 測定には不向きであると判断した。本プロジェクトで扱う高輝度 X 光源では広範囲の X 線のエネルギーを発生させることができる為、すべてのエネルギーレンジで一つの検出器で対応することは難しいが、RAYANCE 社の検出器は厚い CsI 結晶を用いることにより、90 kV の X 線に対応し、また、低エネルギー、たとえばマンモグラフィーで用いられる、17.5 keV に相当する X 線のエネルギーに関しては、カーボンの保護シートを外すことで対応することができる為、現時点で最適であると判断した。

⑤-2.3 市場調査

X 線分析市場において、コンパクトで輝度の高い X 線発生装置が常に求められている。ラボ用の実験装置としては、(株)リガクが販売する回転対陰極型の発生装置 FR-X が現在最高輝度 (3 kW $\phi 70 \mu\text{m}$ フォーカスサイズ) を実現している。しかし、実験室系 X 線発生装置は、第 3 世代の放射光施設で発生できる X 線と比較して、輝度、強度とも大幅に及ばない。実験室系の X 線発生源は、いつでも使用できるという利点を持つが、一方、放射光施設の利用には、申請書

の提出、限られたマシンタイム、限られた実験時期など、利用上の自由度に関して大きな制約がある。このため、実験室系 X 線発生装置と放射光 X 線源との間を埋める、コンパクトで利用における自由度の高い高輝度、高強度の小型 X 線発生装置に対する潜在的な需要は十分に存在すると考えられる。

今後、以下の分析分野、イメージング分野において市場調査を継続しておこない、装置の仕様の作成を進める。

1. 分析分野
 - a) たんぱく質構造解析
 - b) 小角散乱
2. イメージングアプリケーション
 - a) 位相コントラストイメージング
 - b) マイクロトモグラフィー
 - c) マンモグラフィー
 - d) メディカルイメージング

特にイメージングアプリケーションの中では位相コントラストイメージングが注目されている。その応用として実験動物分野、食品異物分野、セキュリティ分野、工業用分野、医薬品分野、工業材料分野、医療用分野での要求仕様に関して調査・検討を進める。

⑤-3 まとめ

平成 25 年度は、小型高輝度 X 線源の特性評価のための実験装置に関する整備を行った。また、検出器を評価し、photon-integrating-type である CMOS 検出器を採用することとした。

⑥ クライオ光陰極高周波電子銃開発（再委託先：学校法人日本大学）

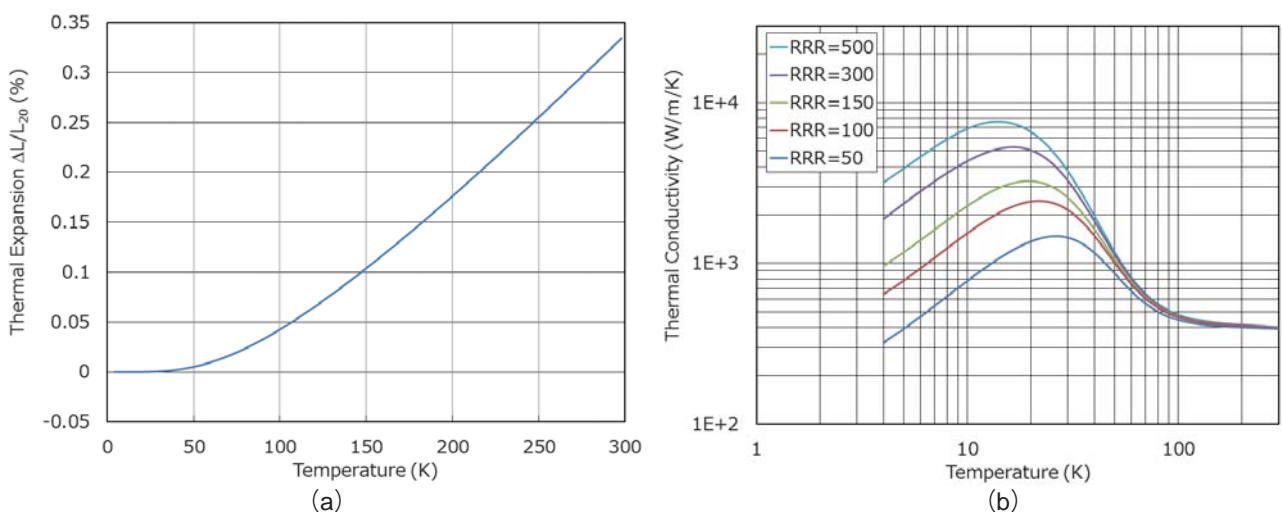
概 要

銅製の高周波空洞を常温ではなく 20 K まで冷却することで、常伝導でありながら電力損失の低い高効率の RF 電子銃を実現するため、C バンドで π モード 2.6 セル空洞からなる光陰極高周波電子銃空洞の基本構造を検討し試作を行った。実機の高周波電子銃空洞は常温で加工し、常温での高周波特性を確認した後に冷却して使用することになる。しかし常温で加工・測定し 20K まで冷却した際、空洞の高周波特性、特にその共振周波数が収縮によりどのように変化するかについては、十分信頼できる知見はこれまでのところ見当たらない。課題であるクライオ光陰極高周波電子銃の開発を進めるに当たっては、まず空洞特性の温度変化の振舞いを調べる必要がある。平成 25 年度は電子銃空洞の基本構造を設計し試作することで、常温と 20K での高周波特性を比較した。試作では KEK に超精密加工を依頼し、空洞部品の加工終了後に KEK で常温における共振周波数と軸上電界分布の測定を行い、概ね 2 次元計算コード SUPERFISH による計算に近い結果を得た。さらに常温において詳細な測定を繰り返し行った後に、拡散接合法により空洞を組み立て 20K での測定を行う予定である。

⑥-1 銅の低温特性に関する検討

銅を 20K まで冷却した際に、高周波空洞の特性を主に支配する物性として、線膨張率、熱伝導率、表面抵抗が挙げられる。線膨張率に関しては、多くの測定結果に基づき温度依存性を表す近似関数が得られている。また、熱伝導率に関しても、代表的な無酸素銅の純度に依存して低温での熱伝導率を与える計算式が得られている（参照：http://cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/OFHC%20Copper/OFHC_Copper_rev.htm）。

無酸素銅における線膨張係数の温度依存性から求めた、各温度における、20 K を基準とした寸法増加率を⑥-図 1 (a) に示す。20 K に比較し 25°C (298.15K) における寸法の増加は 0.3343% となる。従って、加工製作した高周波空洞の共振周波数は、20 K においてそれだけ高くなることが期待される。また、20 K 付近での線膨張係数は常温の 1/100 程度であることから、高周波

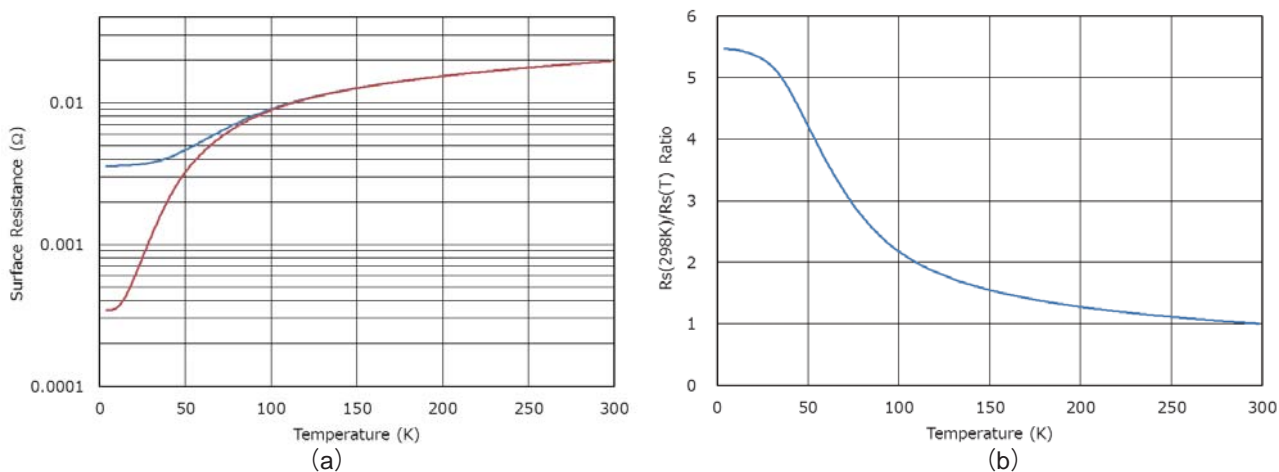


⑥-図 1. 無酸素銅の線膨張係数から求めた、20 K を基準とした各温度での空洞寸法の増加率(a)、及び残留抵抗比の異なる銅に対する熱伝導率の温度変化(b)。

空洞の共振周波数は常温に比べると温度変化に対して非常に鈍感であるということが出来る。残留抵抗比（RRR）の異なる銅に対する熱伝導度の温度変化を⑥-図 1(b) に示す。空洞製作に使用する銅材として RRR=3000 以上に相当する 6N8 の高純度銅材を用いることから、20 K 付近での熱伝導率は常温に比べ数 10 倍大きくなることが期待される。このことは、高周波電力の投入に伴う空洞各部の不均一な温度変化と形状変化が抑制される可能性を示唆している。

高周波空洞の表面抵抗 R は、入力高周波電力の壁損失及び空洞の Q 値を決める重要なパラメータで、常温においては、空洞材料の電気伝導度 σ と高周波に対する空洞表皮の厚さ δ を用いて $R=1/\sigma$ で表される。しかし、低温においては金属中自由電子の平均自由行程が極端に長くなるために異常表皮効果が生じ、表面抵抗の周波数と温度への依存性が常温とは異なる振舞いを示すことが知られている。直流特性では 20 K での高純度銅材の比抵抗が残留抵抗比程度と非常に低くなるが、高周波に関しては常温での表面抵抗の式をそのまま適用できず、実効的には表面抵抗はかなり大きな値となる。従って、20 K で動作する銅製の高周波空洞の特性は、異常表皮効果を取り入れた表面抵抗で議論する必要がある。

異常表皮効果の理論的な解析は Reuter と Sondheimer によってなされており（G. E. H. Reuter and E. H. Sondheimer: Proc. the Royal Society of London A, Mathematical and Physical Sciences, 195, 1042(1948), pp. 336-364）、これに基づき高純度銅材を用いた 5712 MHz の高周波空洞における表面抵抗の温度依存性を計算によって求めた。結果を⑥-図 2 に示す。⑥-図 2(a) は、RRR = 3000 の銅材について表面抵抗の温度依存性を計算した結果を示しており、赤線は異常表皮効果を考慮しない場合、青線は異常表皮効果のある場合である。⑥-図 2(b) は、異常表皮効果による表面抵抗に関して、298 K における値と各温度における値との比を示している。従って⑥-図 2 (b) は 298 K と冷却下での空洞の Q 値の比を示す。このことから、異常表皮効果の理論に従えば RRR = 3000 の高純度銅材で製作した 5712 MHz 空洞では、298 K で 10000 の Q 値が、20 K では 54000 程度になると期待されることを意味する。これに対して⑥-図 2(a) から、異常表皮効果を考慮しない場合には 20 K での表面抵抗はさらに約 6 倍低く見積もられ、20 K における Q 値が常温の 30 倍程度になるはずだが、実際にはそうならず、異常表皮効果によって表面抵抗が良く説明されている。



⑥-図 2. 残留抵抗比 RRR=3000 の高純度銅材について、5712 MHz の高周波に対し計算した表面抵抗の温度依存性。(a)：表面抵抗の計算結果。青線は異常表皮効果による計算結果、赤線は異常表皮効果を考慮しない場合。(b)：異常表皮効果による、298 K における表面抵抗値と各温度での表面抵抗値の比。

⑥-2 クライオ高周波電子銃空洞の仕様

高純度銅材からなる 5712 MHz 高周波空洞を 20 K まで冷却した際の特性について検討した結果に基づき、基本的な空洞の構造と、20 K 冷却時の動作仕様を検討した。空洞は BNL 型の π モードピルボックス 2.6 セルで構成する。空洞の冷却は 50 W の 20 K 冷凍機 2 台で行うこととした。これにより空洞の発熱が 100 W 以下となる条件の下で、現実的な空洞特性を考慮し検討した結果を⑥-表 1 に示す。

⑥-表 1 の仕様を検討した際には、高周波空洞内の電界分布の詳細は考慮せず、入力高周波電力、空洞の無負荷 Q 値、シャントインピーダンス、加速空洞部分の長さ、加速電子ビーム電荷量、そして外部導波管と空洞との間の結合係数 β のみを仮定した。従って、完成した実際の空洞の特性により、現実の仕様は若干異なるが、良い近似を与えらる。また、ビーム負荷の存在と、実際の電子ビーム速度を反映した予備的な加速シミュレーションから、実際に 0.5 nC の電子バンチを電子銃から引き出した場合には、加速エネルギーが約 3 MeV となる。ただし、空洞内の電界が最大 100 MV/m を超える場所が生じると予想されるため、動作時の放電の可能性には注意を払う必要がある。

20 K での空洞の無負荷 Q 値は常温に比べ大きくなるため、導波管と空洞との結合係数が小さいと空洞内電界の立ち上がり時間が非常に長くなる。高周波のパルス幅内の加速効率を高くするため、電界の立ち上がり時間を短くする必要があり、結合係数を大きくし負荷 Q 値を十分下げることに対応することにした。20 K での無負荷 Q 値 60000 を仮定した場合、結合係数を 20 にすることで、空洞内電界の立ち上がりを 0.16 μ s まで短くすることができる。

ビーム負荷がないとき、空洞の尖頭高周波損失は 726 kW となるが、1 秒当たりではその 1/10000 の 72.6 W となる。また、光陰極に照射するレーザーパルス繰り返し 357 MHz で最大ビーム負荷となるときには、約 64 kW の空洞損失となる。

⑥-3 空洞の設計

平成 25 年度は 20 K に冷却した際の空洞の共振周波数変化等の、高周波特性を知ることが目標であることから、実際に高周波電子銃として動作させるときに必要な光陰極の組込み部分や外部から高周波電力を入力する結合器は考えず、基本的な構造の空洞を試作することにした。空洞の寸法を決定する計算には 2 次元電磁界計算コード POISSON-SUPERFISH を用いた。

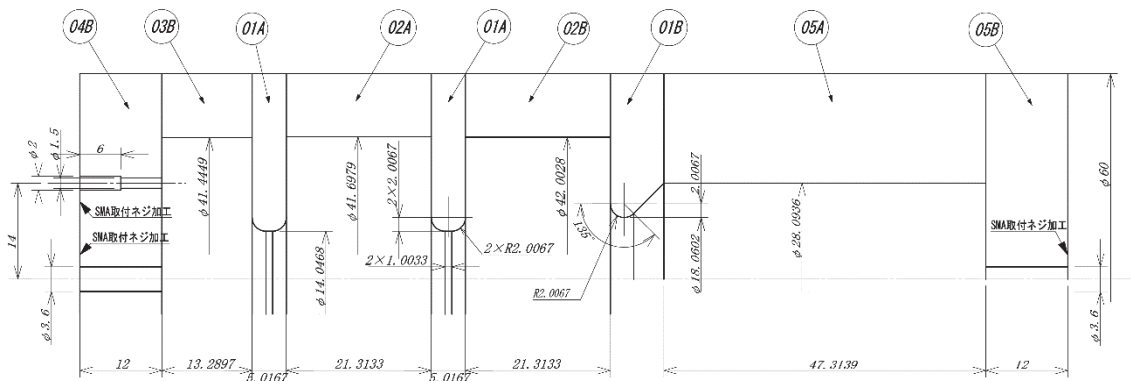
実機での結合器として、同軸構造結合器の採用を検討し、結合器と接続する空洞部分の非対称ディスク構造を決定したが、試作においては同軸結合器部分の内部導体の製作は省略した。この結果、結合器部分は円筒導波管と等価ではあるが径が小さいため加速高周波がカットオフとなる構造となった。結合器部分の構造は、内部導体なしでも試作における加速空洞部分の電界分布には大きく影響しないことが計算から確かめられた。ただし、内部導体を実際に製作し結合器とした場合、内部導体の冷却の問題があることから、同軸結合ではなく円筒導波管結合の検討を別途進めている。

⑥-表 1. 20 K 動作時の高周波電子銃の仕様

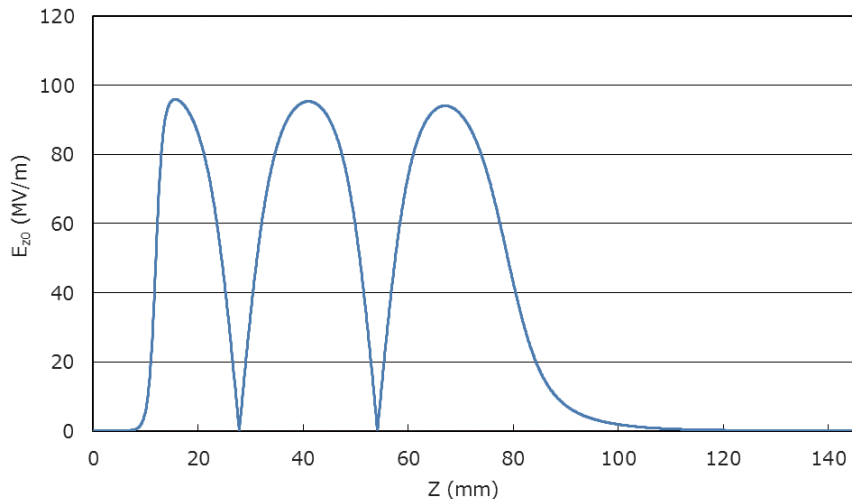
| | |
|--------------|-------------------|
| RF 周波数 | 5712 MHz |
| 最大入力 RF 尖頭電力 | 4 MW |
| 無負荷 Q 値 | 60000 |
| シャントインピーダンス | 500 M Ω /m |
| 結合係数 β | 20 |
| 加速空洞長 | 68.2 mm |
| RF パルス幅 | 2 μ s |
| RF パルス繰り返し | 50 Hz |
| RF パルス占有率 | 0.01 % |
| 最大電子バンチ電荷 | 0.5 nC |
| レーザーパルス繰り返し | 357 MHz |
| レーザーパルス長 | 10 ps |
| 最大空洞損失 | 72.6 W |
| 最大加速勾配 | 51.7 MeV/m |
| 最大加速エネルギー | 3.5 MeV |

加工寸法の決定では、まず空洞の共振周波数が 5712 MHz となる寸法と形状を決定し、その後、⑥-図 1 の膨張比から、加工時の温度を 298 K とし、20 K から 298 K への寸法換算を行って加工寸法とした。⑥-図 3 に試験用に組み立てたときの空洞の断面図の 1 例を示す。図中の寸法は 298 K における値である。試作空洞では、本来光陰極が位置する左端の空洞壁面中心部が単純な平面のままとなり、また、通常の加速空洞のように加速ビームが通過する孔構造は存在しないが、右端の結合器用セル部分はカットオフのため生じる電界が非常に小さく、空洞に試験用の高周波を導入する必要から、左端壁にアンテナ挿入孔を設けることにした。左端壁に孔が開いている場合、孔なしのときの共振周波数からずれを補正するために、孔径に応じて 0.6 セル空洞の内径を調整する必要がある。そこで、左端壁の孔の有無と径によって共振周波数が変化しないよう、左端壁に接続するシリンダーは、孔に応じて異なる内径のものを製作した。⑥-図 3 の空洞組立図は、空洞内の軸上電界測定用であり、ビーズプル法で電界分布測定を行うために、釣り糸に取り付けた直径 2 mm の金属球を空洞の軸上を移動させる必要から、左端壁と右端壁に直径 3.6 mm の孔を開けた端板を用いている。高周波入力には、ビーズの移動と干渉しないよう、空洞中心軸から 14 mm 離れた端板上の位置に直径 1.5 mm の孔を開け、SMA コネクタに取り付けたアンテナを通して行う。

POISSON-SUPERFISH では 3 次元計算ができないため、⑥-図 3 の構造に対しては、中心軸から 14 mm 離れた端板上の孔を無視して電磁界計算を行った。長さ 68.2 mm の加速空洞部分における電界の振幅の平均が 70 MV/m となるよう規格化を行ったとき、軸上電界分布の計算結果を⑥-図 4 に示す。



⑥-図3. 試作高周波電子銃の軸上電界測定用の組合せとなる空洞の設計断面図。実機では、左端内壁中心部が光陰極の位置となり、図の右側部分を円筒導波管型の結合器に変更し高周波を入力する予定。図の左から右に向かって電子が加速される。左右端板の直径3.6 mmの孔は、電界測定用のビーズを通すために開けてある。図中の空洞寸法は、20 Kで共振周波数が5712 MHzとなるよう298 Kで加工する際の指定寸法。



⑥-図4. POISSON-SUPERFISHで計算した、⑥-図3の構造における軸上電界の振幅分布。加速空洞部分68.2 mmの間の平均振幅を70 MV/mに規格化してある。横軸は、⑥-図3における左端の端板外壁面からの距離。

⑥-4 試作空洞の共振周波数と電界測定

空洞の加工発注はKEKに依頼し、加工業者が精密加工を行った。加工寸法は298 K（摂氏温度での正確な値は24.85℃）での値を指定したが、実際に加工業者が加工を行った温度は23.5℃であった。この温度差を考慮すると、正確に寸法通りに加工されていた場合には、20 Kにおいて本来の共振周波数より約128 kHz低い周波数の空洞に仕上がることになる。各空洞部品については、加工後の寸法を実測してあるので、今後さらに詳細に周波数の測定を行い、寸法誤差との関係を確認する。その後に拡散接合を行い、20 K冷却時の周波数測定に進む予定である。

空洞部品が仕上がった段階で、KEKにおいて最初の周波数測定及び電界分布測定を行った。空洞の周波数と電界を測定するために試作した部品の組合せは、合計5種類ある。それらの組合せを⑥-表2に示す。

⑥-表 2. 試作空洞の試験用セル組合せ

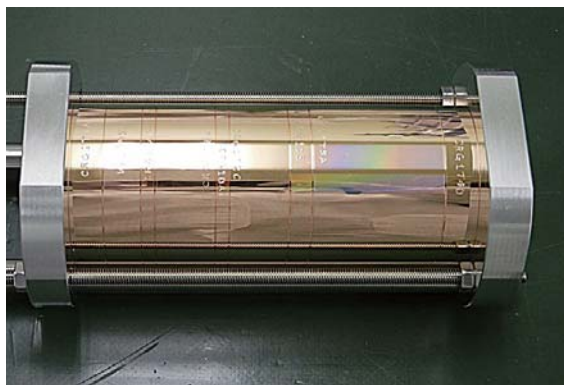
| 番号 | 目的 | 組合せ |
|----|-------|--|
| ① | 周波数測定 | 左端板（孔なし）+ 0.6 セル+ 1 セル+ 1 セル+ 結合器用セル + 右端板（ ϕ 3.6 mm 孔） |
| ② | 電界測定 | 左端板（ ϕ 3.6 mm 孔）+ 0.6 セル+ 1 セル+ 1 セル+ 結合器用セル + 右端板（ ϕ 3.6 mm 孔） |
| ③ | 周波数測定 | 左端板（ ϕ 2.0 mm 孔）+ 0.6 セル+ 1 セル+ 1 セル+ 結合器用セル + 右端板（ ϕ 3.6 mm 孔） |
| ④ | 電界測定 | 左端板（ ϕ 3.6 mm 孔）+ 0.5 セル+ 1 セル+ 0.5 セル+ 右端板（ ϕ 3.6 mm 孔） |
| ⑤ | 周波数測定 | 左端板（ ϕ 2.0 mm 孔）+ 0.5 セル+ 1 セル+ 0.5 セル+ 右端板（ ϕ 2.0 mm 孔） |

⑥-図 3 のように 2.6 セル+結合器用セルからなる空洞が①、②、③である。これらの左端板はそれぞれ、①孔なし、② 3.6 mm 径孔あり、③ 2.0 mm 径孔あり、となっており、端板に接続するシリンダー径が異なる以外の部分は共通である。①の組合せは、左端板は単なる平板で、高周波は右端板の中心軸上の孔を通して入力する構成になっているが、結合器用セル内の電界が極端に低いため、入力の結合が小さく、この組合せでの測定はまだ行っていない。②の組合せの端板は、ビーズプル法により電界測定を行う際に、ビーズを通すのに必要十分と考えられる 3.6 mm 径の孔を中心軸上に開けてある。またこの端板には、高周波入力用とピックアップ用に、中心軸から 14 mm 離れて軸に関して対称な位置に 1.6 mm 径の孔が 2 か所開けられているが、接続されるシリンダーの内径はこれらの孔の影響を考慮せずに決めてある。③の組み合わせは、端板の中心軸上のみ開けた 2.0 mm 径の孔を使って高周波を入力し共振周波数のみを測定するのが目的で、シリンダー径はこの孔の影響を補正してある。

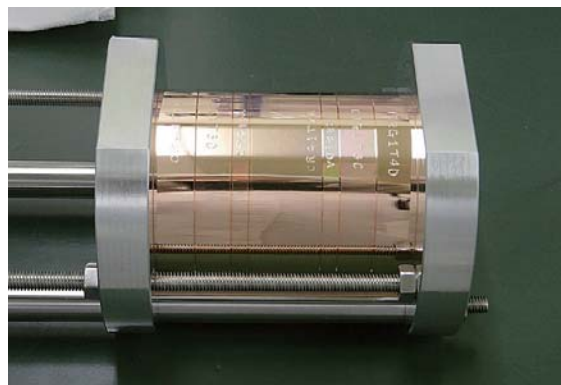
以上の組合せに加えて、ディスク 2 枚とその間のシリンダーから成る 1 セルについて、その特性を確認するための試験空洞を用意した。1 セル空洞の試験では、左右から 0.5 セル空洞で挟む形にし、端板がそれぞれ④ 3.6 mm 径、⑤ 2.0 mm 径、のもので組合せる 2 種類となる。0.5 セルのシリンダーも、0.6 セルと同様に端板の孔径に合わせて異なる内径のものを製作した。ディスク 2 枚はすべての組合せに共通である。⑤の組合せは、周波数測定のみが目的で、③と同じ中心軸上に 2.0 mm 径孔の端板を使用している。

⑥-図 5 に、表 2 の③と⑤の組合せにおいて共振周波数測定を行った際の、測定治具上の組み立て写真を示す。空洞部品は測定治具上に軸に沿って並べた後、締め付け用長ネジで固定フランジを圧迫し軸に沿って締め付けてある。

⑥-表 2 の①を除いた各組合せについて、 π モードの共振周波数の測定結果を⑥-表 3 に示す。アンテナ挿入孔の径によって空洞との結合が大きく異なり、またアンテナ挿入長さによって共振周波数が変化することから、比較的結合の大きかった組合せでは、端板内面からのアンテナ露出長さを変えた数点で測定を行った。測定結果の周波数は、空洞温度と室温及び湿度を同時に測定し、POISSON-SUPERFISH の周波数換算機能を用いて、真空中且つ 23.5℃での共振周波数に換算し、さらに線膨張係数から 20 K での周波数に換算を行った結果を示している。なお、POISSON-SUPERFISH の周波数換算機能を使って 20 K での周波数に換算することも可能だが、我々の線膨張係数計算による換算より約 60 kHz 低い値となる。



(a)



(b)

⑥-図5. 空洞を測定治具上で組み立て、共振周波数測定を行った際の写真。(a)：2.6 セル+結合用セル、(b)：0.5 セル+1セル+0.5セルの組合せ。

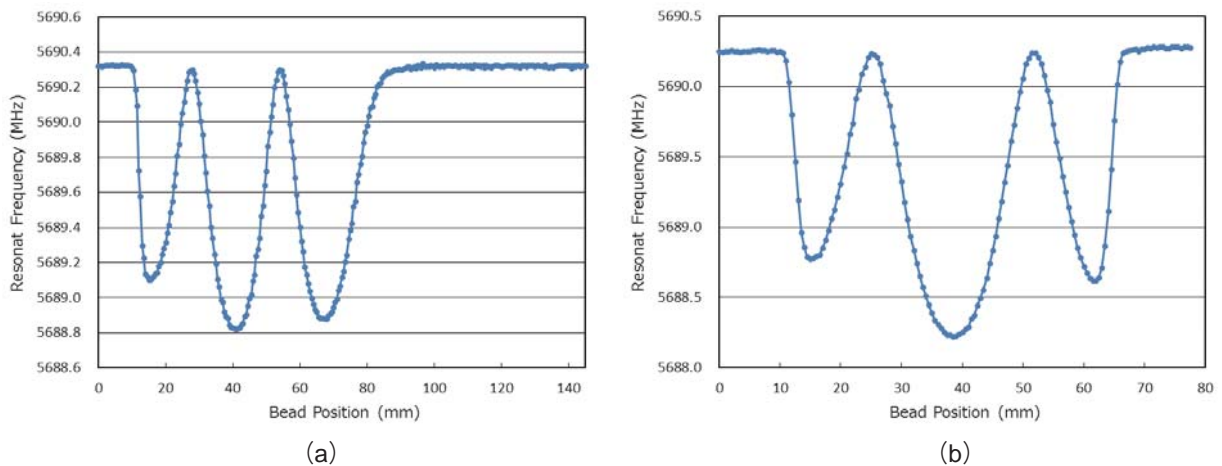
⑥-表3において、off axis としてあるのは、中心軸から 14 mm 離れた 1.5 mm 径の孔にアンテナを挿入して測定した場合を指し、それ以外はすべて中心軸上の 2.0 mm または 3.6 mm 径の孔に挿入して測定している。また、⑤-1 は、⑥-図 5(b) の左右の 0.5 セルのうち、右側部分に 3.6 mm 径孔付き端板とそれに対応したシリンダーを使用して測定している。一方⑤-2 は、左右とも 2.0 mm 径孔付き端板で、表 2 の⑤に正しく対応した組合せでの測定結果である。ネットワークアナライザを用いた測定値には数 10 kHz の変動があったが、表 3 の結果では、概ね周波数測定のみを目的とした③と⑤の組合せでアンテナの露出長が負の結合が小さい場合で約 5711.5 MHz、一方電界測定用の組合せである②と④ではほぼ 5711.35 ~ 5711.39 MHz、という違いが見られる。これは端板の中心軸から離れた位置のアンテナ挿入孔の有無の違いによる可能性が考えられる。従って、計算で考慮しなかった孔の効果を除くと、計算に用いた線膨張率が正しければ、加工温度が 23.5℃であったことによる 128 kHz の違いを補正して、目標とした 5712 MHz に対して概ね誤差 400 kHz 以内の精度で加工されていると考えられる。

⑥-表3. π モード共振周波数測定結果

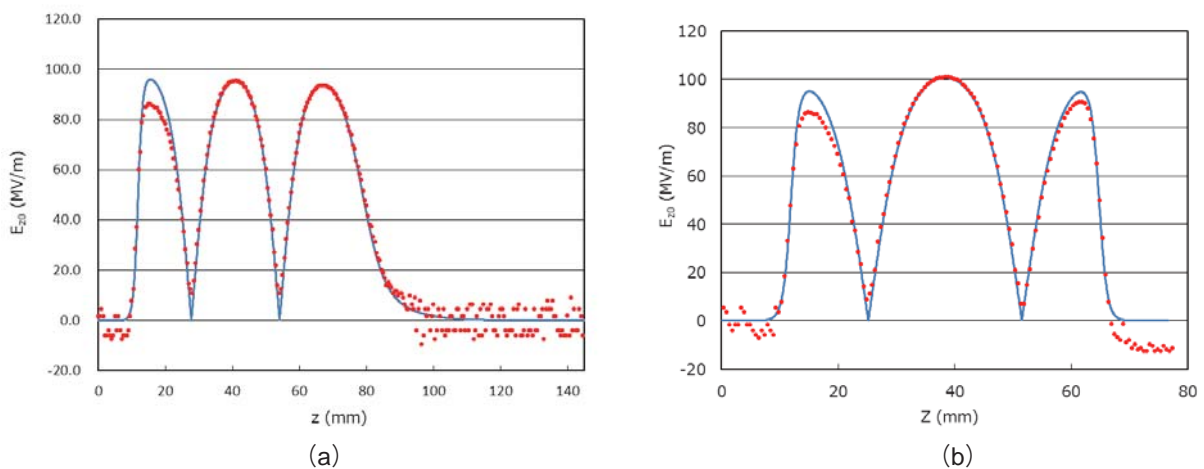
| 組合せ番号 と測定条件 | アンテナ露出長 (mm) | 23.5℃ 真空中周波数 (MHz) | 20K 真空中周波数 (MHz) |
|----------------|-----------------|-----------------------|---------------------|
| ②-off axis | 0.4 | 5692.4803 | 5711.3811 |
| ② | -0.65 | 5692.4898 | 5711.3907 |
| ③ | -0.15 | 5692.6549 | 5711.5563 |
| ④-off axis | 0.4 | 5692.4526 | 5711.3533 |
| ④ | -0.65 | 5692.4464 | 5711.3471 |
| | -0.4 | 5692.4339 | 5711.3345 |
| | -0.15 | 5692.3897 | 5711.2902 |
| ⑤-1 | -0.15 | 5692.5777 | 5711.4788 |
| | 0.1 | 5692.4914 | 5711.3923 |
| | 0.4 | 5692.4477 | 5711.3484 |
| ⑤-2 | 0.4 | 5692.4142 | 5711.3148 |

次に、 π モードの電界測定の結果を⑥-図6に示す。⑥-図6(a)は2.6セル+結合セルの場合、(b)は0.5セル+1セル+0.5セルの場合である。図の横軸は、左端板外面付近から右へのビーズ移動距離、縦軸は電界強度の2乗に比例して変化した共振周波数で、23.5℃の真空中に換算してある。測定時の信号のS/N比を改善するためアンテナの挿入長さを大きくしており、全体に共振周波数は⑥-表2の結果より低くなっている。POISSON-SUPERFISHによる電界強度の計算結果と比較するために、周波数変化の平方根をとって電界強度に比例した量を求め、加速空洞部の平均電界振幅を70 MV/mに規格化した結果を⑥-図7に示す。

⑥-図7(a)の2.6セル+結合セルの組合せの測定結果は、左端の0.6セルで約10%の電界低下を示している。また、(b)の0.5セル+1セル+0.5セルの組合せでも、左端のセルで約10%の電界低下を示している。一方、(b)では右端の電界が発生していない位置で負の値を示している。これは明らかに測定開始と終了で空洞温度が異なっていたことが原因である。測定に当たって



⑥-図6. ビーズプル法によって測定した、(a) 2.6セル+結合セル、(b) 0.5セル+1セル+0.5セルの組合せに対する共振周波数変化の結果。高周波はどちらも左端板のアンテナ孔を通して入力し、測定は右端から開始している。

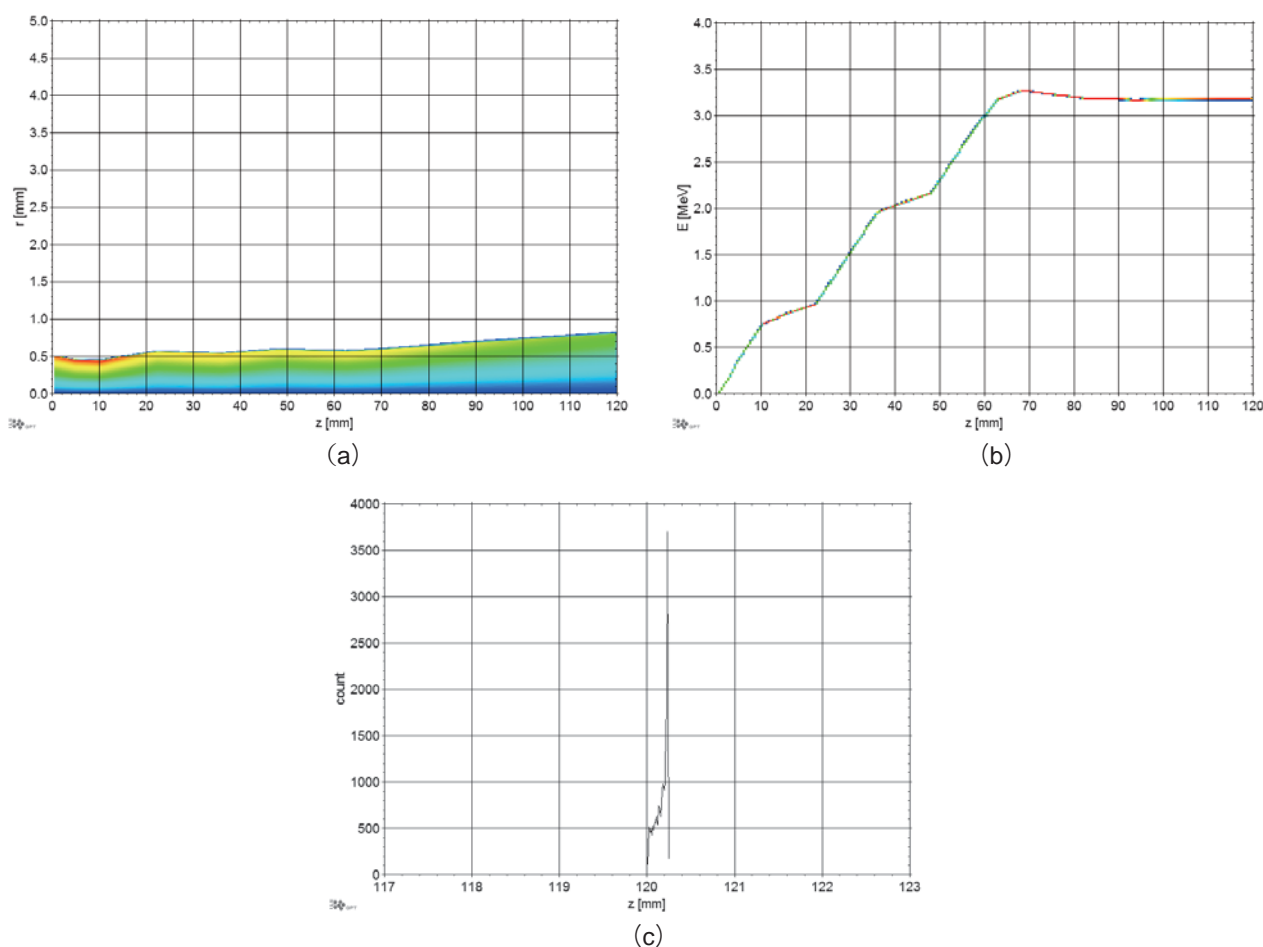


⑥-図7. POISSON-SUPERFISHによる電磁界計算結果との比較。(a)、(b)は⑥-図6の(a)と(b)にそれぞれ対応している。青線は計算結果、赤丸の点はビーズプル法による周波数変化の測定から電界分布に換算した結果。計算値は庭訓電界振幅を加速空洞部で70 MV/mに規格化し、測定から得られた分布を中央の1セルのピークに合わせてある。

は、常時空洞と大気の温度変化を測定し、図の結果は周波数の温度補正を行ってあるが、(b)では測定開始時に温度が低く、十分温度が落ち着く前に測定を開始していたことから、測定温度が正確に空洞寸法を反映していなかったと考えられる。気温変化の少ない環境でさらに測定し確かめる必要があるが、右端で負となり 0.5 セルのピークが数 % 低いのは、温度補正が不十分であったことで説明できると考えられる。このことを考慮すると、(a)と(b)のどちらの組合せでも左端のセルで約 10% の電界低下が観測されたのは、端板の 1.5mm 径のアンテナ挿入孔を通した高周波入力の影響によると考えられる。従って、測定結果はほぼ空洞内に計算通りの分布で電界が発生していることを示していると考えられる。

⑥-5 ビーム加速シミュレーション結果

SUPERFISH による加速電界計算の結果から、ビーム加速シミュレーションコード GPT (General Particle Tracer) を用いて、電子銃光陰極からのビーム引き出し及び加速のシミュレーションを行った。その結果を⑥-図 8 に示す。設計仕様では、20 K 冷却時に実使用となる空洞で達成されるシャントインピーダンスは、光陰極取り付部及び RF 入力カップラー部が原因となって Q 値の低下が生ずる可能性を考慮し、控えめな値として 500 M Ω /m と設定しているが、SUPER-



⑥-図 8. GPT による、20K 冷却光陰極高周波電子銃空洞における電子ビーム引き出し及び加速シミュレーションの結果。粒子数 10000 個で計算。(a)：陰極面から出口まで加速中の横方向ビーム広がりの変化、(b)：電子の運動エネルギー分布の変化、(c)：空洞出口における縦方向ビーム分布のヒストグラム。

FISHによる空洞のみの計算結果からは、20%以上高い約610 MΩ/mが得られている。このためGPTによるシミュレーションでは空洞内ピークRF電力600 kWで3 MeV以上の加速が可能、という結果になった。さらに、電子銃カソードへのレーザー入射パルス10 ps（位相幅約20°）、光ビーム直径1 mmとし、RF位相80°付近で0.5 nCの電子ビームが引き出される場合、電子銃空洞出口においてビームエネルギー幅1.5 keVで、1 ps（位相幅2°）にバンチされたビームが得られることが示唆された。これらの結果から空洞形状はほぼ最適化されていると判断できる。

⑥-6 まとめ

平成25年度は、クライオ光陰極高周波電子銃の仕様を検討し、それに基づき電子銃空洞の基本構造についての検討・空洞の電磁界計算を行い、試作を行った。空洞加工後の初期の測定結果によれば、チューナー構造（空洞壁外表面にネジによる数mm直径程度の変形部を取り付ける予定）なしで概ね予定していた周波数5712 MHzに近い共振周波数が得られた。また、ビーズプル法による電界分布測定結果は、概ね計算通りの電界が得られていることを示した。さらに詳細な測定を繰り返す必要があり、その後拡散接合により完成した空洞を20 Kに冷却した際の共振周波数の確認を行う。

⑦ 大強度高繰り返しレーザー開発

(再委託先：学校法人早稲田大学)

概 要

本プロジェクトでは加速器からの電子ビームと光共振器内に蓄積したレーザーパルスとのレーザーコンプトン散乱によって高輝度 X 線を生成する。早稲田大学では光ターゲットである光共振器に蓄積する大強度高繰り返しレーザーシステムの開発を行っている。平成 25 年度はレーザー発振器開発を行い、フェムト秒モードロックパルスレーザー発振器の製作・実証を行った。非線形偏波回転法によるモードロッキングの確認とその安定化に努めた。また、開発したレーザーの光共振器への蓄積を確認することにより、十分な品質が得られていることを示すとともに、高繰り返し化に向けた光共振器によるパルス繰り返し増倍化を行った。

⑦-1 非線形偏波回転を用いた Yb 添加ファイバモードロックレーザー発振器開発

本『小型加速器による小型高輝度 X 線源とイメージング基盤技術開発プロジェクト』では加速器からの電子ビームと光共振器内に蓄積したレーザーパルスとのレーザーコンプトン散乱によって高輝度 X 線を生成するとともに、X 線イメージング技術開発を行う。光共振器ではレーザー光を同位相で数百～数万回重ね合わせることによって入力レーザー光の数百～数万倍のレーザー光を蓄積することができる。共振器に蓄積できるレーザー光は共振器の境界条件によって非常に厳しい制約が課され、その制約を満たすレーザー光を種光として使用しなければならない。

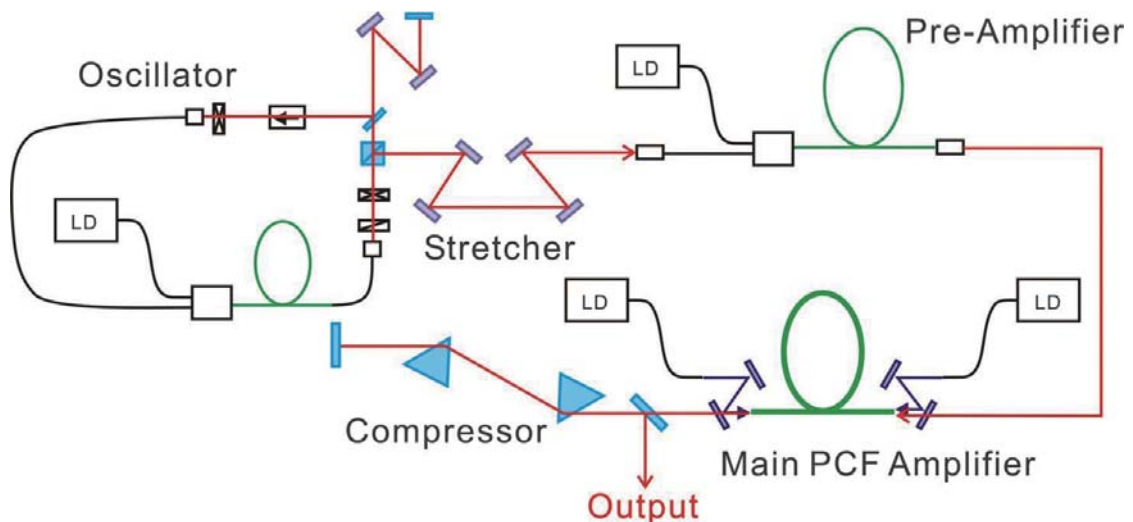
種光に必要とされる条件としては、一部共振器への要求とオーバーラップする部分があるが、下記のもの挙げられる。

- ・共振器内で位相を重ね合わせるために、波長の整数倍が共振器長であること
- ・パルスレーザー蓄積のために共振器の周回と一致したパルス繰り返しであること
- ・大強度のレーザー光であり、かつこれを共振器内で増大させる
- ・光共振器内の固有モードと一致した理想的な TEM00 モード発振に限りなく近いこと
- ・電子ビームのバンチ繰り返しとパルス繰り返しが一致していること
- ・ナノメートル以下の共鳴幅を維持するために非常に高速な制御が可能であること

以上の要求を鑑みると、Yb 添加ファイバを用いたレーザーシステムが最も適していると結論できる。Yb 添加ファイバは広い発光帯域を持つとともに非線形偏波回転 (NLPR) によるモードロッキングが可能であり、発振器の後に Chirp Pulse Amplification (CPA) による大強度化が可能である。また、ファイバ中を伝搬することで、伝搬モードも制限され、ほぼ理想的な形状での発振、増幅が可能である。最終的に想定するレーザー構成を以下の図 1 に示す。NLPR 法によるモードロックレーザー発振器により発振したレーザー光をストレッチャーでパルス伸長し、その後プリアンプ、メインアンプを通して最終的に圧縮したパルスレーザーを光共振器に蓄積する。レーザーパワーとしては、発振器後では数十 mW 程度、プリアンプ後で 1 W、メインアンプで 10 W 以上を見込んでいる。基本的な構成は様々な研究機関で開発が行われている

ハイパワーレーザーと同様であるが、本レーザーは光共振器蓄積に特化した形を見込んでおり、このようなレーザーが開発されることによって非常に高いポテンシャルを秘めた光蓄積共振器の利用が幅広く広がることが期待できる。

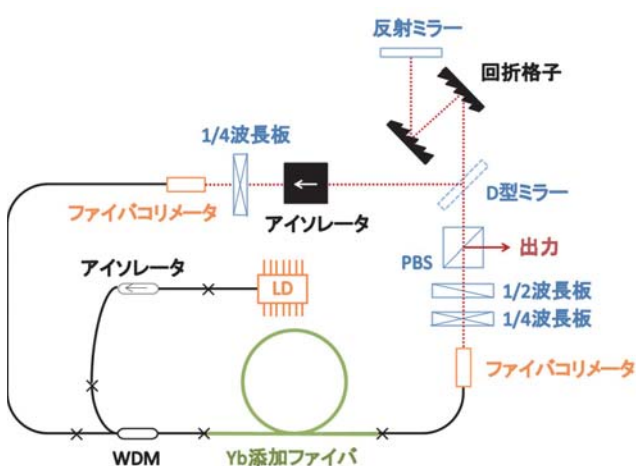
平成 25 年度はこのレーザー構成の中で非常に重要なパルス特性を決定づける NLPR モードロックレーザー発振器の製作、光共振器への蓄積試験、高繰り返しパルス生成のためのパルス繰り返し通倍共振器の開発を行った。



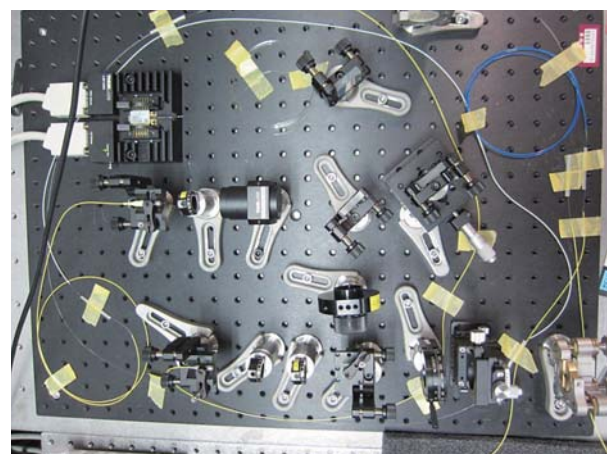
⑦-図 1. 最終的な光共振器蓄積用パルスレーザーの構成想定図

⑦-1.1 非線形偏波回転法による Yb 添加ファイバモードロックレーザー発振器の開発

⑦-図 1 の最終構成図の最上流に位置し、光パルスの特性を決定づける発振器の開発を行った。基本構成とその写真を以下の⑦-図 2、3 に示す。⑦-図 2 に示す通り、Yb 添加ファイバをゲイン媒質とし、大半をファイバ中で構成したレーザー発振器になっている。NLPR 法とはファイバ中で非常に微小な空間を伝搬する際に発生する非線形効果を用い、光強度によって偏光の回転が異なることから受動的にピーク強度が高い光のみを周回させモードロックを起す手



⑦-図 2. NLPR 法モードロックレーザーの構成図

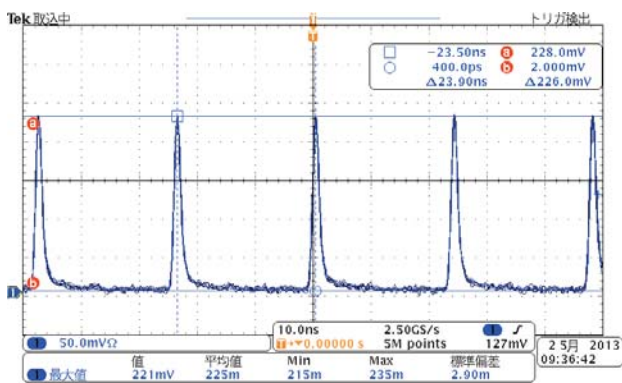


⑦-図 3. 構成した NLPR 法モードロックレーザーの外観写真

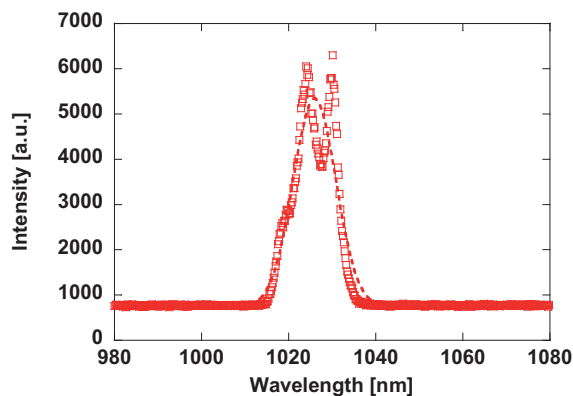
法である。自由空間中に設置された回折格子対によってファイバ内の分散を補償し、ファイバ内で非線形効果を起こりやすくしている。⑦-図2に示した構成は基本構成であり、試行錯誤によってよりモードロッキングが起こりやすい構成を追求した。最終的な構成としては、可飽和吸収ミラー (SESAM) を導入し、回折格子として反射型ではなく、透過型の回折格子を利用することによって、非常に容易にモードロッキングを得ることができた。

次に発振したパルスの特性測定の結果を示す。それぞれパルス発振時のパルス検出オシロスコープ写真 (⑦-図4)、パルス発振時の光スペクトル (⑦-図5)、オートコリレータによるパルス幅計測結果 (⑦-図6)、パルス発振時のビームプロファイル (⑦-図7) となっている。

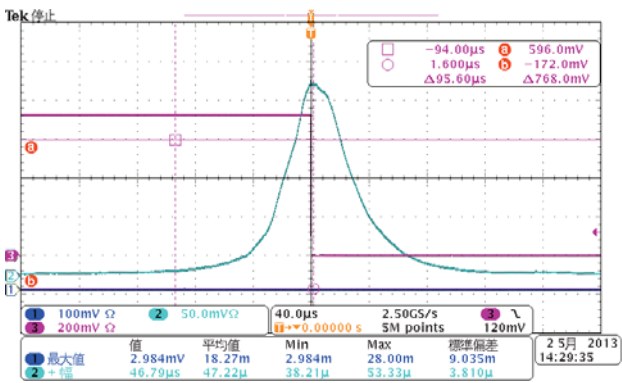
⑦-図4を見てわかるとおり、非常に安定かつ平坦なパルスが生成されていることがわかる。パルス繰り返しは約 40 MHz である。この時の光スペクトルを示したのが⑦-図5である。発振パルス光のスペクトル幅は FWHM で 11.3 nm であった。パルス幅とスペクトル線幅にはフーリエ関係が成り立っており、これから予想される最短パルス幅は 200 fs(FWHM) 程度と見積もることができる。そのパルス幅を計測した結果を⑦-図6に示す。これはオートコリレータ (自己相関) の出力結果であり、パルス時間幅に直すと 770 fs(FWHM) であった。前述のフーリエ限界パルス幅と比較すると長いパルス幅であるが、これは効率的にモードロック発振をするために分散補償を調整しているため、発振のためには 770 fs 程度が最適であったことを示している。スペクトル線幅の計測結果より、発振器外部にて分散を完全に補償することによって 200 fs 程度のパルス幅が得られるものと考えている。最後に⑦-図7に発振したレーザーのプロファイル



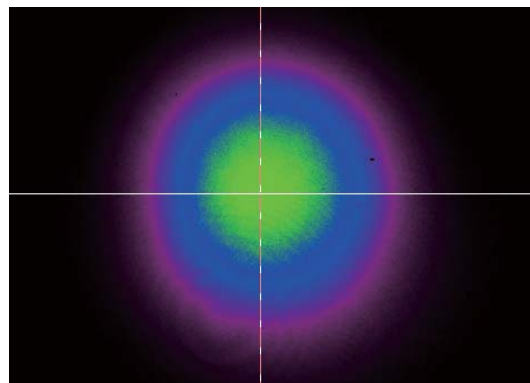
⑦-図4. モードロック発振したパルス列



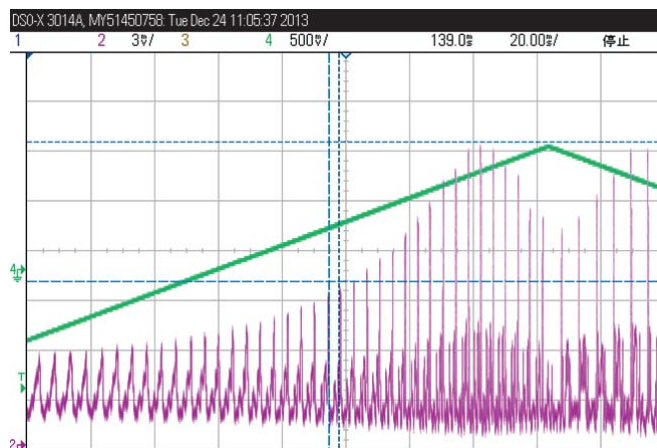
⑦-図5. パルス発振時のレーザースペクトル



⑦-図6. オートコリレータを用いたパルス幅計測結果



⑦-図7. レーザー発振時の横方向プロファイル



⑦-図 8. 光共振器にパルスレーザーを蓄積した際に観測した Airy Function 波形

を示している。ファイバ中を伝搬しているため、明らかではあるが、非常に綺麗な横モードで発振していることがわかる。このような非常に安定かつきれいなパルス発振を確認したことで、まずは光共振器に蓄積可能であろうパルス発振器を構築することができた。

⑦-1.2 Yb ファイバレーザー発振器の共振器蓄積試験及びパルス繰り返し逡倍化試験

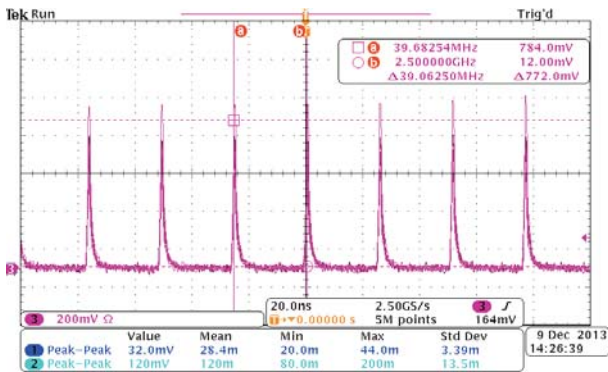
モードロック発振器の構築・評価の結果を受け、製作したパルスレーザー光の光共振器蓄積試験及びパルス繰り返し逡倍化試験を行った。前節での評価により、一般的な意味で非常に性能の良いパルスレーザーが得られていることは確認したが、本研究の目的は光共振器への蓄積が可能なパルスレーザー光の開発である。そのため、まずは光共振器への蓄積実証試験を行った。以下の⑦-図 8 にその際に得られた Airy Function の波形を示す。緑線が共振器に設置した piezo 素子に印加している電圧値のモニターであり、線形に共振器長を変化させていることがわかる。紫線は共振器から得られる透過光の強度を示しており、ほぼ一定間隔でピークを構成していることがわかる。これはそれぞれが共鳴点を示しており、ピーク間隔はちょうど半波長 (500 nm) 程度に一致する。

この Airy Function 波形が得られることによって、実際に共振器蓄積が可能であることを確認できている。この Airy Function は細かいピークが観測されているのはもちろんであるが、広いピーク形状の中に細かいピーク構造が構成されていることがわかる。これはレーザーを構成する光の周波数分布と光共振器のサポートする周波数が微妙に異なっていることを示しており、幅広いピークの幅及び共振器の Finesse からレーザーのスペクトル線幅を概算することが可能である。現在の共振器の Finesse 31.4 より計算される線幅は 10 nm (FWHM) であり、ほぼ⑦-図 5 の計測結果に一致することがわかる。最終的には入射効率等を詳細に測定する必要があるが、現時点では最適設計した光共振器を用いていないため、平成 26 年度以降に評価していく予定である。

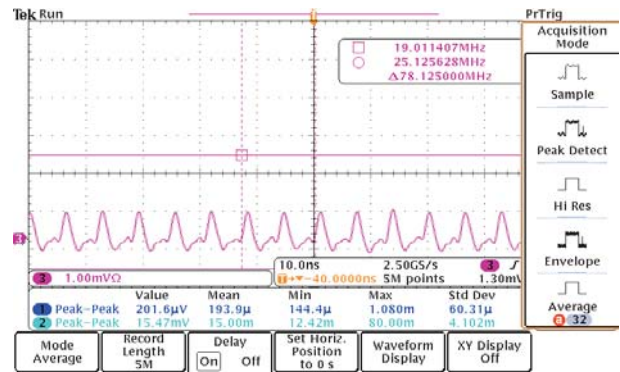
次にパルス繰り返しの逡倍化に関して試験を行った。レーザー発振器から生成されるパルス列の繰り返しは発振器の周回周波数に一致する。したがって高繰り返しパルスを得るためには発振器を短く構成する必要がある。しかしながら前述の通り、NLPR 法によるモードロッキングはファイバ中における非線形効果を用いるため、ある程度のファイバ長が必要になる。そこ

で、発振器直後においてパルス繰り返しを逡倍化する光共振器を設置することを考案した。逡倍化共振器とはレーザーのパルス繰り返しに対して共振器の周回周波数が整数倍の共振器であり、多少光強度を犠牲にするものの、これを通すことによってパルス繰り返しを逡倍化できるとともに光周波数分布も共振器に合ったものに変換できる。今回は約40 MHzのパルスレーザーに対して4逡倍の160 MHzの逡倍共振器を用いて試験を行った。その結果を以下の⑦-図9、10に示す。

⑦-図9は光共振器に入射した40 MHz 繰り返しのレーザー光、⑦-図10は逡倍共振器を通過したレーザーパルスを示している。横軸のスケールが2倍異なっていることに注意いただきたい。パルス間隔を計測すると、もともと25.6 ns 繰り返しであったレーザーパルスが逡倍化共振器によって6.4 ns 間隔となり、完璧に4逡倍されていることがわかる。⑦-図9と⑦-図10でパルス形状が異なるように見えるのは逡倍後のパルス間隔が非常に狭いため、前パルス信号のテールが重なってしまっているためである。実際には逡倍化後のパルスのパルス幅等を評価し、最終的な結論を出すことになる。これらは平成26年度以降の課題である。



⑦-図9. 光共振器に入射した発振パルス



⑦-図10. 逡倍共振器によってパルス繰り返しが4逡倍されたパルス列

⑦-2 まとめ

平成25年度は、NLPR法によるYbファイバモードロック発振器の製作・評価を行った。パルス幅・安定度・スペクトル線幅・プロファイルともに非常に理想的な性能が得られるとともに、光共振器への蓄積が可能であることも示した。また、高繰り返しパルスレーザー実現のための繰り返し逡倍化共振器の試験も行い、実際に逡倍が可能であることを示すことができた。

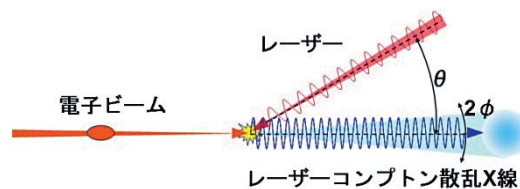
⑧ 小型加速器を用いた逆コンプトン散乱光源による最適なイメージング手法の開発
(再委託先：独立行政法人産業技術総合研究所)

概 要

小型加速器を用いた逆コンプトン散乱光源と最適なイメージング手法の開発のため、計算機シミュレーションによって生成される逆コンプトン散乱 X 線のエネルギー・角度分布を求めた。物理的距離の制限があるなか、光源近くに回折格子を置いた Talbot-Lau 干渉法を用いれば、干渉イメージングが可能であることがわかった。また、安定に逆コンプトン散乱 X 線を供給し、長時間イメージングを可能にするための衝突用レーザーシステムの安定化開発を行った。波長 800 nm の Ti:Sa レーザー発振器を小型のクリーンブースに別設置し、温調することで約 30 fs の安定なレーザーを増幅部に供給することができた。増幅部では、チャープパルス増幅を別設置のクリーンブースにて行い、100 mJ/pulse 以上の安定な増幅を行うことに成功した。最適な X 線イメージング手法探索のため、電子ビームとレーザーを衝突させるためのコンプトンチェンバーの設計・製作を行った。

⑧-1 最適なイメージング技術開発のための逆コンプトン散乱生成 X 線の評価計算

本研究では、小型加速器を用いた逆コンプトン散乱光源による最適なイメージング手法を開発するため、実環境に近い形での逆コンプトン散乱 X 線の生成エネルギー・角度分布等を計算し、位相コントラストイメージング等に十分な条件を探索する。



⑧-図 1. 逆コンプトン散乱 X 線の模式図

逆コンプトン散乱は、⑧-図 1 のように通常のコンプトン散乱とは実験室系におけるエネルギーの付与が逆転しており、高エネルギーの電子ビームが低エネルギーの光子（レーザー）を高エネルギーの光子（X 線）として弾性散乱させるものである。逆コンプトン散乱により発生する X 線のエネルギー ($h\nu$) は、入射光子（レーザー）のエネルギー： $h\nu_0$ 、入射電子のエネルギー： $\gamma m_0 c^2$ (γ : ローレンツ因子, m_0 : 電子の静止質量, c : 光速)、レーザーの入射角： θ 、X 線の散乱角： ϕ とすると、式 (1) で表すことができる。

$$h\nu = \frac{(1 + \beta \cos \theta) \cdot h\nu_0}{1 - \beta \cos \phi + [1 + \cos(\theta + \phi)] \cdot \frac{h\nu_0}{\gamma m_0 c^2}} \quad (1)$$

また、散乱光子の最大エネルギーは散乱角 $\phi = 0^\circ$ （電子の進行方向軸上）において得られ、1 次近似を用いて

$$E_X^{\max} = 2\gamma^2 E_L (1 + \beta \cos \theta) \quad (2)$$

と求めることができ、散乱角 ϕ について展開すると、

$$E_x(\phi) \cong \frac{1}{1+(\gamma\phi)^2} E_x^{\max} \quad (3)$$

が得られ、散乱光子のエネルギー分布はローレンツ型となり、 $\phi = 1/\gamma$ の角度においては、散乱光子のエネルギーは最大エネルギーの 1/2 となる。また、X 線の強度は、散乱断面積とビーム形状などによって決まるルミノシティとの積によって算出される。ルミノシティは、衝突するそれぞれのビームがどの程度の強度でどのような分布（空間的・時間的）をしているかを表す物理量である。散乱断面積は、通常のコンプトン散乱では Klein-仁科の式として知られているが、逆コンプトン散乱の場合も、電子の静止系を実験室系へローレンツ変換することにより散乱断面積を求める。本研究では、上記の逆コンプトン散乱の性質を踏まえ、電子ビームとレーザーのサイズを立体的に考慮した上で、モンテカルロシミュレーションによる生成 X 線の計算を実施した。その際の計算パラメータを⑧-表 1 に示した。

⑧-表 1. 逆コンプトン散乱の計算パラメータ

| | |
|--------------|------------------------------------|
| 電子エネルギー | 40 MeV |
| 電子エネルギー幅 | 0.2 % |
| 電荷量 | 1 nC/bunch |
| 電子エミッタンス | 3 π mm mrad |
| 電子スポットサイズ | 40 μ m(σ_x, σ_y) |
| 電子バンチ長 | 10 ps(FWHM) |
| レーザー中心波長 | 800 nm |
| 波長スペクトル幅 | 0.4 %(rms) |
| レーザースポットサイズ | 38 μ m(σ_x, σ_y) |
| レーザーパルス幅 | 10 ps(FWHM) |
| レーザー偏光 | 直線偏光 (X 方向：水平方向) |
| 衝突角 θ | 10 度 |
| 生成 X 線エネルギー | 38 keV (最大) |

ここでは、電子ビームの中心エネルギーを 40 MeV、レーザーの中心波長を 800 nm とし、最良解ではなく、通常のオペレーションを模擬するため、一般的な電子エネルギー幅、及び波長スペクトル幅を設定した。

⑧-図 2 にシミュレーション結果における生成 X 線の強度プロファイルを示す。図では、XY 方向の散乱角に対する強度分布であり、 ± 10 mrad のウィンドウを設定している。⑧-図 3 に Y 方向のエネルギー分布を、⑧-図 4 に X 方向のエネルギー分布を示す。これらの結果から、強度分布はレーザーの偏光方向に依存した楕円形状を示し、レーザーの偏光方向に対しては、中心付近でもエネルギー幅が大きくなることがわかる。また、実際に逆コンプトン散乱 X 線を利用する際、エネルギー分布は極めて重要であり、生成した X 線のうちどれくらい利用可能かが

異なってくる。逆コンプトン散乱では、中心付近の X 線が準単色であることがよく知られているが、実際に使用するためには、中心付近からある程度離れた発散角の X 線を取り込む必要がある。

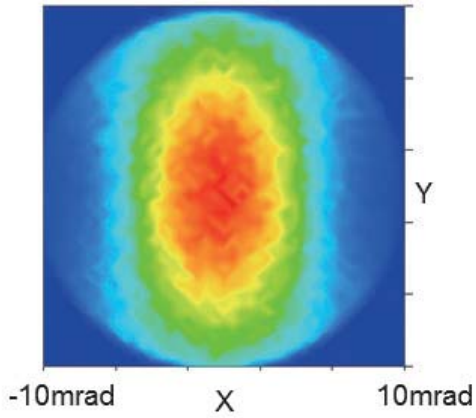
そこで、X 線の発散角を± 3 mrad、5 mrad、10 mrad 以内とした時のエネルギー分布を⑧-図 5-7 にまとめた。実際に使用する際は、電子ビームをビームダンプに導く偏向電磁石があるため、光源からある程度離れた位置に X 線取り出し窓を設置するが、その位置でのウィンドウサイズ等がアパーチャーとなり、例えば、2 m 地点で 40 mmφ のウィンドウを用いた場合は、± 10 mrad 以内の X 線を取り出すことになる。

⑧-表 2. X 線エネルギー幅のまとめ

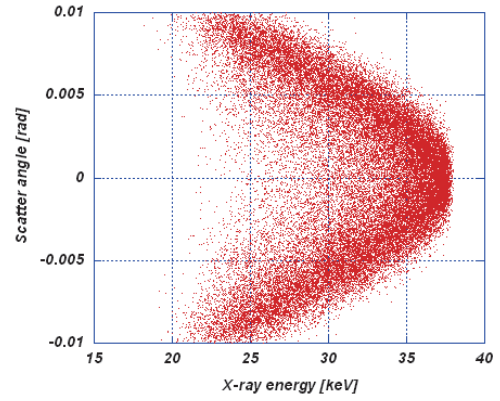
| 許容発散角 | X 線エネルギー |
|---------|------------------|
| 10 mrad | 31.3 keV ± 13.5% |
| 5 mrad | 33.5 keV ± 9.6% |
| 3 mrad | 34.4 keV ± 8.7% |

上記結果から、イメージング等の利用のため 10 % 以下のエネルギー幅を確保するためには、ウィンドウ等によるアパーチャーを± 5 mrad 以内の X 線が取り出せるように設定する必要がある。これは、光源から 2 m の位置に 20 mmφ のアパーチャー等ウィンドウを設置することに相当する。これらの結果をもとに、再委託先（東北大学、百生研）のグループの協力により、本研究ではジオメトリックな光学系に物理的距離の制限があるなか、光源近くに回折格子を置いた Talbot-Lau 干渉法を用いれば、干渉イメージングが可能であることがわかった。Talbot-Lau 干渉法によるイメージング実験の X 線回折格子等条件の詳細は、本報告書「⑩ 小型高輝度 X 線発生装置を用いた X 線位相イメージング法の開発（再委託先：国立大学法人東北大学）」を参照されたい。

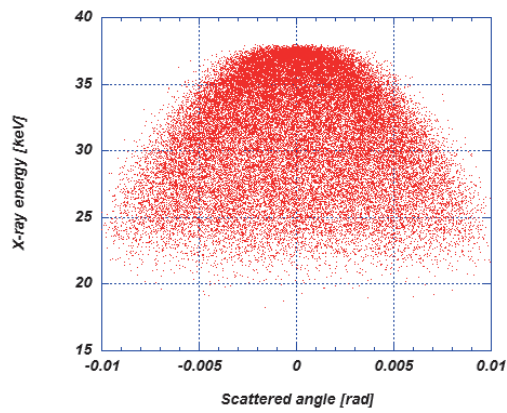
また、逆コンプトン散乱 X 線を用いたイメージング手法として、上記の Talbot-Lau 干渉法の外、より簡便な密着法・インライン位相コントラスト法がある。特に光源の特性である数 10 μm 程度の微小光源性を利用した場合、インライン位相コントラスト法による撮像においては、エッジコントラストとして（最大信号強度－最少信号強度） / （最大信号強度＋最少信号強度）を定義すると、これまでのいくつかの研究からサンプル-検出器間距離が 1 m 程度の場合は密着法と比較し 2 倍以上、20 cm 程度の場合でも 20% 以上のエンハンスメント効果があることがわかった。また、集光撮像法においては、ポリキャピラリーを用いた逆コンプトン散乱 X 線集光撮像の検討を行った。光源から距離 2 m 地点にキャピラリー（インプット焦点距離 2 m）を設置し、キャピラリーからアウトプット焦点距離 100 mm の地点で集光すると、キャピラリー入口で約 15 mmφ の X 線を焦点付近で約 500 μmφ に集光できることになる。集光のための予備実験では、キャピラリーのアライメントが最も重要であり、XYZ の 3 次元方向だけでなく、特にキャピラリーのあおりを加速器室内で自動コントロールをする必要があることがわかった。



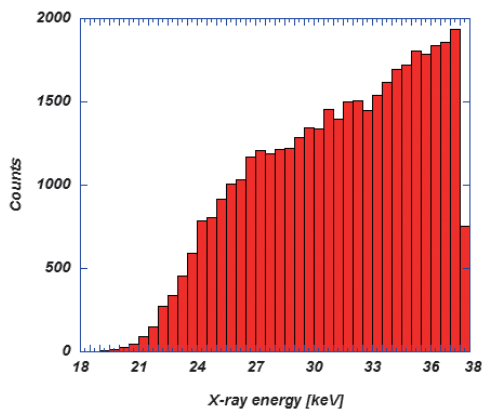
⑧-図 2. 生成 X 線の強度プロファイル



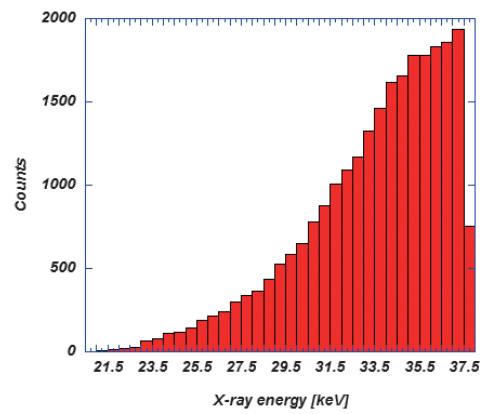
⑧-図 3. Y 方向のエネルギー分布



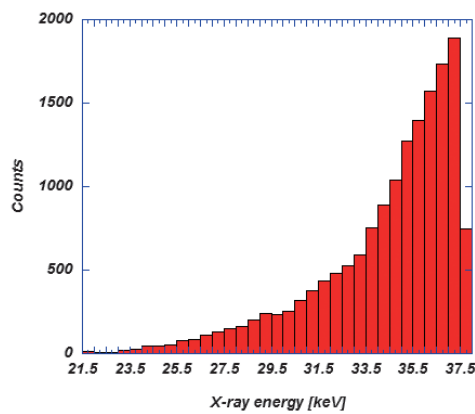
⑧-図 4. X 方向のエネルギー分布



⑧-図 5. ± 10 mrad 以内のエネルギー分布



⑧-図 6. ± 5 mrad 以内のエネルギー分布



⑧-図 7. ± 3 mrad 以内のエネルギー分布

⑧-2 安定な逆コンプトン散乱 X 線生成のためのレーザーシステム開発

本研究において、逆コンプトン散乱のための衝突に用いるレーザーは、加速器の加速周波数 2856 MHz に同期したモードロック周波数 79.3 MHz の Ti:Sa モードロックレーザー発振器からの種光レーザーを、ストレッチャー、再生増幅器、プリアンプ及びメインアンプにて、100 mJ 超までチャープパルス増幅 (Chirped Pulse Amplification) し、パルスコンプレッサーにて 100 fs(FWHM) まで再圧縮する仕様となっている。ピーク強度として 1 TW 超に圧縮したレーザーパルスは、レンズで集光し真空中で電子ビームと衝突させるが、時間・強度ともにその揺らぎが生成 X 線に大きく影響してくる。そこで、本研究ではレーザーシステムの安定化開発を行った。

まず、安定化のために⑧-図 8 に示すようなレーザー発振器 (スペクトラフィジックス社製) を導入した。このレーザーを、⑧-図 9 に示す温調機を完備した小型のクリーンブースに設置し、ストレッチャー・アンプ以降とクリーンブースを分離して温調することで、増幅時の安定化を図った。空調機の温度は 19°C に設定し、レーザー発振器の冷却水温度も同じ 19°C に設定し、0.1 度以下の安定度で制御した。

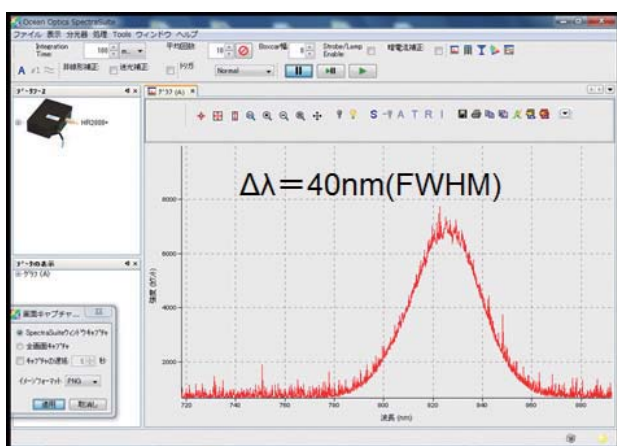
安定な増幅を行うためには、チャープパルス増幅のためのスペクトルの広帯域化が必要である。本レーザーシステムでは、約 30 fs のパルス幅のレーザーを設計値として用いており、ストレッチャーによって約 200 ps 以上にチャープする必要があるため、上記レーザーのスペクトル測定、及びパルス幅測定を実施した。スペクトル測定には Ocean Optics 社製の HR2000 を用いたところ、⑧-図 10 のように中心波長 800 nm で $\Delta\lambda = 40$ nm (FWHM) のスペクトルを得た。パ



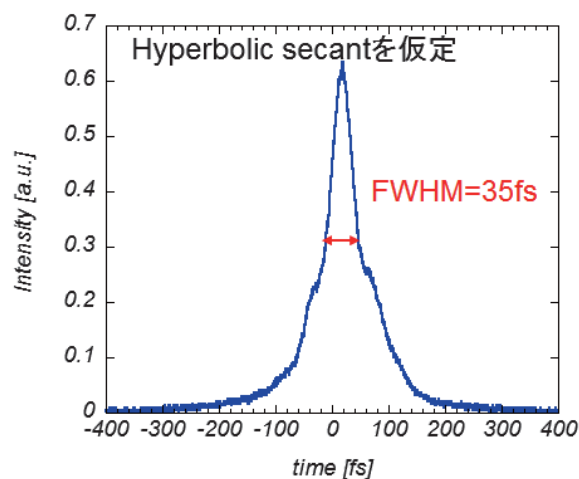
⑧-図 8. レーザー発振器



⑧-図 9. クリーンブースと温調機



⑧-図 10. レーザースペクトル幅

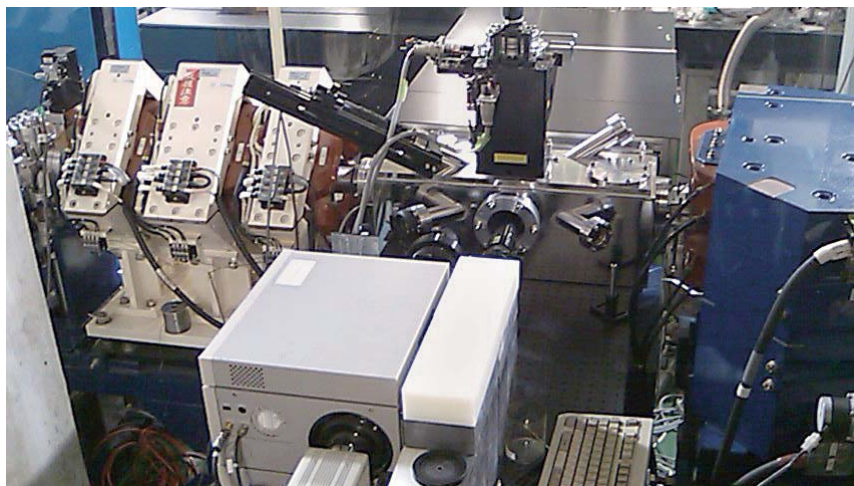


⑧-図 11. レーザーパルス幅

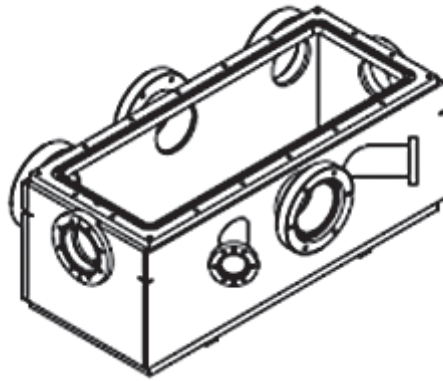
ルス幅測定では、Femtochrome 社製の FR-103XL を用い、出力波形をデジタルオシロスコープによって測定、実時間への換算値によって⑧-図 11 のようなパルス波形を得た。分布関数として Hyperbolic secant を仮定すると、約 35 fs(FWHM) となった。この種光レーザーを、別ブースのストレッチャー・増幅システムに導入した。そして、1200 gr/mm の回折格子を用いたオフナー型ストレッチャーにより、約 200 ps にチャープし、後段の再生増幅器に導入した。再生増幅器では、約 30 mJ の励起レーザーによりビルドアップ増幅波形を得た。増幅パルスをマルチパスのプリアンプに導入し、約 300 mJ の励起レーザー(スペクトラフィジックス社製 Q-ray: Q スイッチ Nd:YAG レーザー二倍波 (532 nm)) により約 60 mJ に増幅し、メインアンプでは約 600 mJ 励起レーザーによるマルチパス増幅により約 180 mJ まで増幅することに成功した。増幅後は、1480 gr/mm の回折格子対によるマルチネス型コンプレッサーにより 100 fs 程度まで圧縮した。圧縮の簡易的確認は、水セルを用いた自己位相変調による白色光によって行った。増幅・圧縮後のレーザーエネルギーは、回折格子の効率が約 60 % であることから、約 100 mJ/pulse 程度であり、安定な逆コンプトン散乱 X 線生成、及びタルボ干渉等の位相イメージングのテスト実験に十分な程度のレーザー増幅に成功したといえる。

⑧-3 安定な逆コンプトン散乱 X 線生成のための衝突チェンバー開発

本研究では、最適な X 線イメージング手法探索のため、電子ビームとレーザーを衝突させるためのコンプトンチェンバーの設計・製作を行った。⑧-図 12 のように、従来はチェンバー上部の蓋をあけることができず、内部へのアクセスがかなり制限されていた。そのため、内部の反射ミラー等の配置も制限されており、15 度衝突以外の衝突角での逆コンプトン散乱 X 線生成実験が困難であった。そのため、⑧-図 13 のように上部の蓋を開閉可能にした衝突用コンプトンチェンバーを設計・製作し、内部へのアクセスを容易なものとし、反射ミラーの設置についても、従来よりもフレキシブルなものに改良することに成功した。今後は、15 度以下の衝突角についても、逆コンプトン散乱実験が行えることになる。ただし、その際でも電子ビームとの干渉については考慮する必要がある、穴あきミラーなどの工夫が必要となる。



⑧-図 12. 変更前の衝突チェンバーと周辺機器（上蓋が開けられず、内部にタップ穴等がないため、ミラー等の配置が制限されている）



⑧-図 13. 上蓋を開閉可にした衝突チェンバー
(底面はタップ穴を切っている)

⑧-4 まとめ

平成 25 年度の研究では、小型加速器を用いた逆コンプトン散乱光源と最適なイメージング手法の開発のため、計算機シミュレーションを実施し、産総研 S バンド小型リニアック施設において生成可能な逆コンプトン散乱 X 線のエネルギー・角度分布を求めた。そして、東北大学百生研の協力のもと、本施設では物理的距離の制限があるなかでも、光源近くに回折格子を置いた Talbot-Lau 干渉法を用いれば、Talbot 干渉イメージングが可能であることがわかった。また、安定に逆コンプトン散乱 X 線を供給し、長時間イメージングを可能にするため、衝突用レーザーシステムの安定化開発を行った。それにより、波長 800 nm の Ti:Sa レーザー発振器を小型のクリーンブースに別設置し、精密に温調することで約 30 fs の安定なレーザーをストレッチャー部、及び増幅器部に供給することができた。別設置のクリーンブースに配置した増幅部では、オフナー型ストレッチャーによるチャープと、再生増幅器、プリアンプ、メインアンプによる多段増幅により約 180 mJ/pulse にチャープパルス増幅をおこなった。マルチネス型コンプレッサーにより約 100 fs への圧縮に成功し、100 mJ/pulse 以上の安定な増幅を行うことに成功した。そして、最適な X 線イメージング手法探索のため、電子ビームとレーザーを衝突させるためのコンプトンチェンバーを設計・製作を行い、平成 26 年度での X 線イメージング実験への準備を開始した。

⑨ スポーク型超伝導空洞開発に於ける設計及び非破壊検査

(再委託先：国立大学法人京都大学)

概 要

スポーク型超伝導空洞（以下スポーク空洞と略す）について市販のコンピューターシミュレーションソフトを使用し空洞内で発生する電子のマルチパクタリング（以下、MP という。）現象の解析を行った。計算モデルは4 スポークの共振周波数 650 MHz、4 スポークの 325 MHz とシングルスポークの 325 MHz の三種について行い、3 つ目は実際に製作する予定のスポーク空洞の基本構成を有す。一次電子の個数は 100 ～ 400 個程度で、所定の面から 0 ～ 8 eV のエネルギーで出射し空洞の共振周波数の rf 励振電磁界に従ってその飛行軌跡をトラッキングさせる。一次電子が空洞内面に衝突するとその入射条件に応じた二次電子を発生するがこれはシミュレーションソフトに組み込まれている Furman モデルを適用した。MP 発生指標としては電子の増殖率と電子数の時間推移とし、トラッキングの 3D プロットなどと合わせてその発生場所を確認した。加速電界勾配 E_{acc} は 0 ～ 22 MV/m までシミュレーションソフトの field factor を可変することでカバーし、実際に運転しうる範囲をすべて調査した。この作業は膨大なものとなるため、「trk.bas」と呼ぶ自動化マクロを開発し、時間短縮と効率化を図った。得られた結果の傾向としては、 E_{acc} が比較的低い場合は MP が起こりにくいが、中程度以上の E_{acc} では空洞のコーナー部分で 2 点間の MP が発生することがわかった。

一方、非破壊検査に関しては楕円型空洞での知見に基づいてどのような検査が可能かの検討を行った。

⑨-1 はじめに

スポーク空洞は楕円空洞に比べ形状が複雑なことから、MP 発生がより起こりやすい懸念がある。空洞設計の段階で MP の発生しやすさや発生する箇所について知見を得て製作に反映すること、また問題が運転中に起こるようなことがあっても、MP 発生についてシミュレーション環境を前もって整えておけばその解決への道筋はたてやすくなるだろう。ここでは、CST 社の MW STUDIO を使って MP 解析を行った結果を報告する。

前述の市販ソフトを使って加速空洞の MP 解析をした報告は Romanov [1] のものがあり、シングルスポーク空洞を対象としている。他の参考資料としては、高 β の超伝導空洞についての MP の一般的な解説が Belomestnykh [2] に、またスポーク空洞について独自の計算環境を開発して解析した Delayen [3] の報告がある。これらの文献を参考に、主に E_{acc} の値をスイープさせたときに、スポーク空洞のどの部分でどのようなレベルの MP がどの E_{acc} 値で発生するか調査した結果を以下に示す。尚、以下の計算で使ったスポーク空洞モデルは全て JAEA の沢村勝氏から提供いただいたもので、モデル生成について氏から多くの助言をいただいたことを感謝します。

⑨-2 マクロ

MP 解析の作業は、 E_{acc} （加速電界勾配）の値を 1 つ設定してコードを走らせ、この値を細かく刻んで繰り返して一連の結果とする。広い範囲をカバーするため、多くのシミュレーショ

ンデータを蓄積する必要があり、大量のデータを取り扱うことになる。このため人為的作業を間違いなく効率的に行う必要性からマクロの開発は不可欠であった。今回開発した trk.bas の基本的な機能を以下に列挙する：

- ・実行環境は MW STUDIO の中で空洞のモデルを形成できている状態で実行させる。
- ・trk.bas のプログラム文の“初期値の設定”で最大加速電界や TRK の field factor の計算刻み、トラッキングの最大タイムステップ数など必要な計算条件を設定する。(TRK と PIC はシミュレーション (ソルバー) 名である。)
- ・マクロを実行するとまず field factor をデフォルト値の 1.0 に設定して TRK ソルバーが走る。最初はまずアイゲンソルバーが動いて所定のモードで電磁界分布を計算し、その後一次電子をあらかじめ決められたエネルギー、個数等の条件で特定の場所から発射させ、決められたタイムステップの上限値 (数万程度) まで電子をトラッキングする。
- ・トラッキングが終わると、トラッキング中に発生した二次電子の総数を記録し、一次電子の数との比などをもとめ、ログファイル (trklog.txt) に記録する。
- ・次に、field factor を最小値から最大値までステップごとに TRK ソルバーを走らせるがアイゲンソルバーはスキップし、トラッキングのみ行うようにしている。field factor の各ステップでの結果を前述のとおりログファイルに記録し、また結果のまとめを記録ファイル (trkresult.csv) に csv 書式で出力し後のデータ整理がしやすいようにした。
- ・本マクロは電子 vs. 時間の 1D プロットをビットマップファイルでローカルフォルダの定められたフォルダにセーブし、同プロットのデータも ASC ファイルでセーブする。そして電子の軌跡の 3D プロットもビットマップファイルにしてローカル内の所定のフォルダにセーブできる。

⑨-3 シミュレーション結果

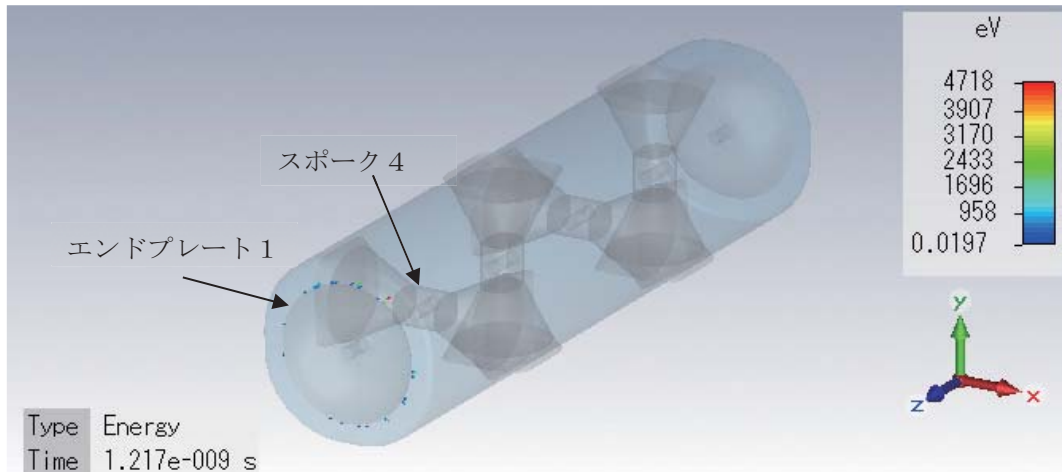
空洞のコーナー部分で MP が発生しやすいはずなので、シミュレーションではそのコーナー近くのエンドプレートと呼ばれる部分に一次電子発生源を設定した。一次電子放出の rf 位相 (以下 phase) のタイミングはまず 360° の全範囲で網羅的に調査し、適当とおもわれる値 0° で後の計算を行っている。Phase = 0° は一次電子放出が近傍のスポーク 4 の電位がプラスの最大値になるタイミングである。

MP 現象は単純には空洞の共振周波数の周期と電子の飛行距離とのレゾナンスなので、ある特定の空洞で共振周波数が決まると MP が起こりうる電子の速度は特定の条件を満たす。電子の速度は空洞内で発生する電界に比例するので、MP は固有の Eacc 値で起こる。これは前述の参考資料でも示されていてよく知られている事象であり、調査対象のスポーク空洞において Eacc 値を実際に使用する可能性の範囲でスイープさせて調査する必要がある。ここでは Eacc を 0 ~ 22 MV/m まで振って調査している。

⑨-3.1 一次電子放出の phase と MP

ここでは MP の phase 依存性を 650 MHz のスポーク空洞で調査した結果を示す。⑨-図 1 は 4 スポーク空洞のモデルを示す。円筒のタンク内に 4 つのスポークを配置し両端にエンドプレー

トで蓋をしたような形をしている。スポークの呼びかたは z 軸のマイナス側から 1、2、3 そして 4 で、エンドプレート 1 がスポーク 4 に面している。一次電子はエンドプレート 1 の外側から決められた phase で出射しその後の電子のふるまいを追跡した。



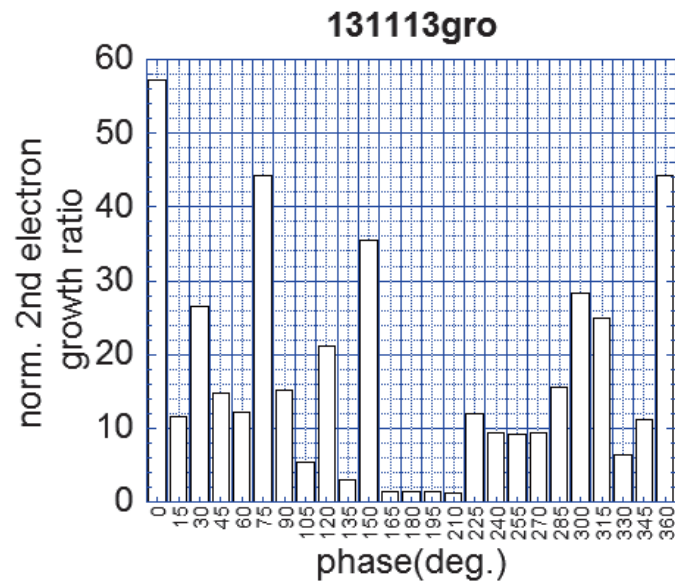
⑨-図 1. 4 スポーク 650 MHz 空洞モデル。手前側がスポーク 4。電子はエンドプレート 1 の縁から出射される。縁にそって見えるのは Phase=180° で一次電子放出後 1.217 ns 経過したときの電子の軌跡。

⑨-表 1 に計算モデルのパラメータを示す。モデル空洞の長さは 1.15 m、直径は 0.29 m である。TRK ソルバーで設定した一次電子数は 1929 個で、計算機の能力を試しながら多すぎず少なすぎずの個数とした。一次電子のエネルギーは比較的低いものが主体と考えられているので 0 ~ 8 eV の均一分布と設定した。TRK 最大ステップ数はあまり多いと電子数が増殖したときに計算機の能力が対応できなくなるおそれもあるので、試行のうえ 2 万ステップとした。このステップ数で最大およそ 100 周期分トラッキングできる。

⑨-表 1.4 スポーク 650 MHz モデルのパラメータ

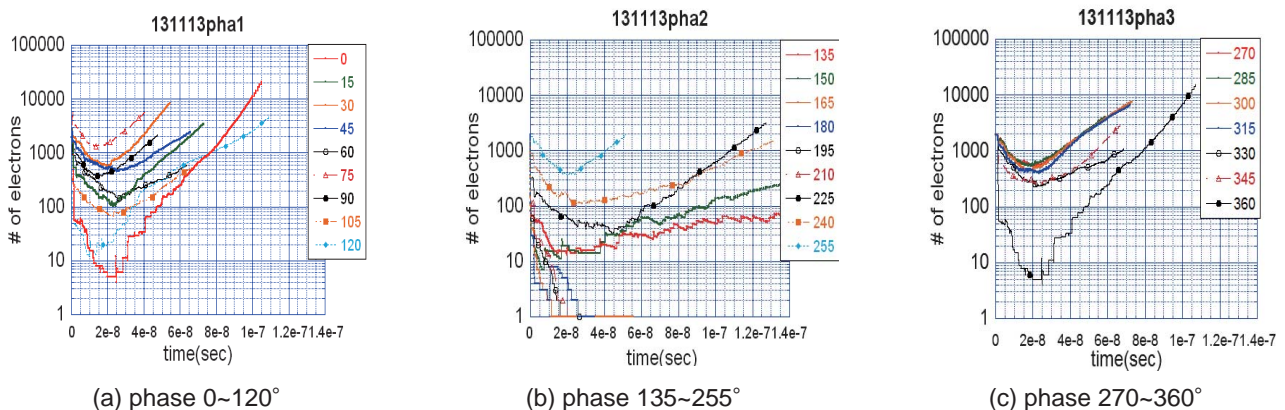
| | |
|-----------------|------------------------|
| fo | 646 MHz |
| Cavity length | 1.15 m |
| Cavity diameter | 0.29 m |
| Eacc | 1.792 MV/m |
| Epeak | 6.641 MV/m |
| Hpeak | 11.097 KA/m |
| R/Q | 1050 Ω |
| mesh cell 数 | ~ 10 万 |
| 1 次電子の数 | 1929 |
| 放出面 | エンドプレート 1 の外縁 |
| エネルギー | 0 ~ 8 eV, 均一分布 |
| Angle spread | 0° |
| 2 次電子放出 | Furman モデル |
| 放出面 | 全ての面 (PEC) |
| TRK 最大ステップ数 | 20000 |
| TRK fields | field factor:1 |
| | phase:0 ~ 360,15° ステップ |

⑨-図 2 は TRK fields の field factor = 1 と固定し、phase を 0 ~ 360°まで 15°ステップでスイープさせた結果を示す。phase = 0°では z 軸上のプラス方向の電界 e_z が z 軸のプラス方向に向いていて最大値となっているタイミングである。よって逆位相となる 180°付近では 1 次電子がそもそも出にくい状況ができるため縦軸で示す電子増殖率 (growth ratio = トラッキング中の総二次電子数 / 一次電子数) の値は小さくなっている。この結果から MP は一次電子の phase にはあまり敏感に影響しないので 0°の一点だけ計算すればよさそうであることがわかった。



⑨-図 2. 4 スポーク 650 MHz 空洞モデルの電子増殖率 (growth ratio) vs. phase のプロット。縦軸は電子数の増殖率。横軸は一次電子放出の phase。

⑨-図 3 は電子の数の時間経過を 0 ~ 360°の範囲で 15°刻みで調べた結果を 3 つのグラフに分けてプロットしている。165~210°ではごく短時間の 30 ns までに電子はほとんど消滅している。その他の条件ではすべて増殖傾向であることがわかる。前述の結果と合わせて、MP 現象は phase が一次電子の放出が適度に促され得る範囲で計算してやれば十分捉えられると判断してよさそうである。よって以降のシミュレーションでは phase = 0°の一点のみ計算している。



⑨-図 3. 電子数の時間経過プロット。0 ~ 360°まで 15°刻みで調査している。一次電子の数は 1929 個。

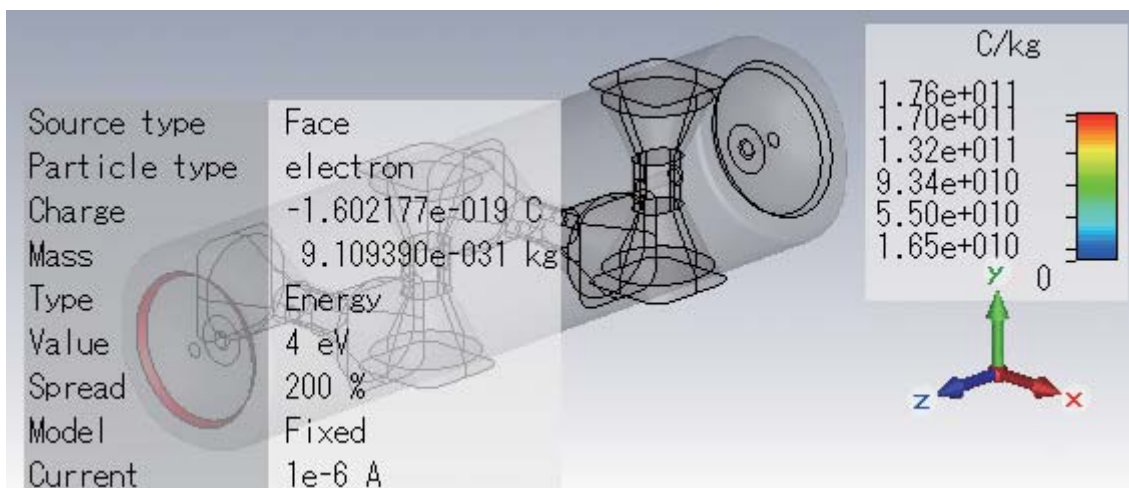
⑨-3.2 4 スポーク 325 MHz 空洞モデル

スポーク空洞の最終的な目標周波数は 325 MHz と前述モデルの半分なので、ここでの計算モデルは前述の空洞の寸法を 2 倍にして MP 現象を調査した。寸法以外は前述モデルと同様だが空洞が大きくなった分計算量が増えるので一次電子数を 400 個まで落とす必要があった。⑨-表 2 に本モデルの主要パラメータを示す。

⑨-図 4 に 4 スポーク 325 MHz モデルを示す。図中左側に赤色で示している部分が一次電子放出面のエンドプレート 1 である。TRK fields の phase は 0° で固定し、field factor を 0.2 刻みで可変させることによって Eacc の範囲 0 ~ 22 MV/m について MP を調査した。

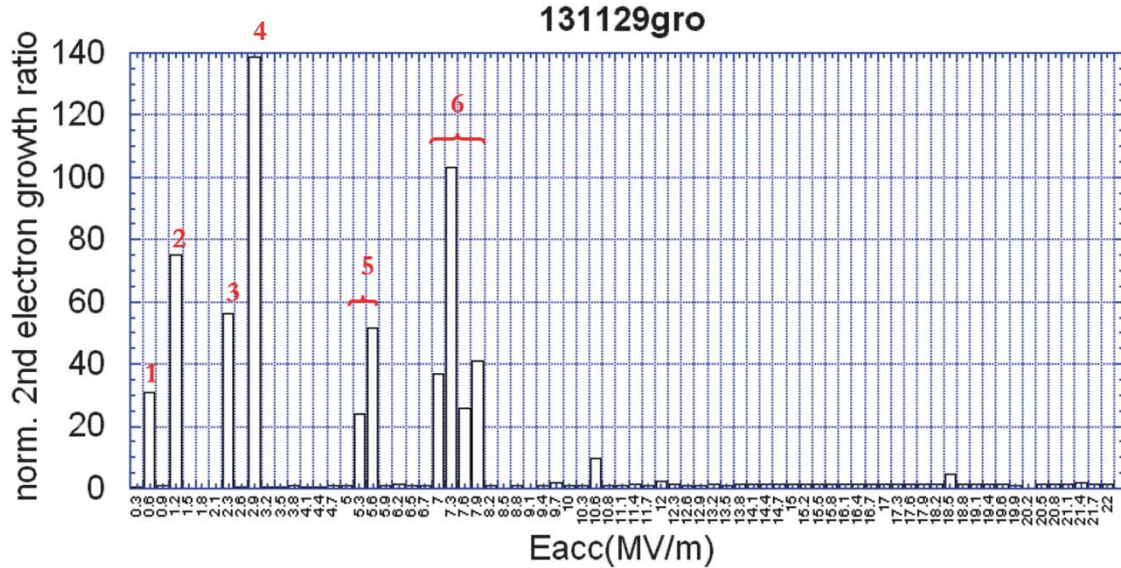
⑨-表 2.4 スポーク 325 MHz 空洞モデルのパラメータ

| | |
|-----------------|--|
| fo | 323 MHz |
| Cavity length | 2.3 m |
| Cavity diameter | 0.58 m |
| Eacc | 1.466 MV/m |
| Epeak | 2.245 MV/m |
| Hpeak | 3.965 KA/m |
| R/Q | 1056 Ω |
| mesh cell 数 | ~ 15 万 |
| 1 次電子の数 | 400 |
| 放出面 | エンドプレート 1 の外縁 |
| エネルギー | 0 ~ 8 eV, 均一分布 |
| Angle spread | 0° |
| 2 次電子放出 | Furman モデル |
| 放出面 | 全ての面 (PEC) |
| TRK 最大ステップ数 | 20000 |
| TRK fields | field factor:0.2 刻みで可変 phase: 0° |



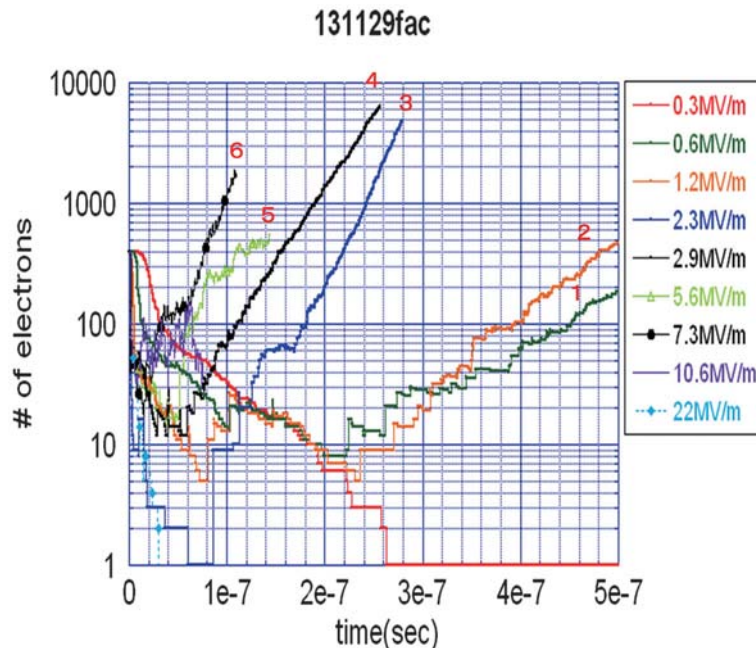
⑨-図 4.4 スポーク 325 MHz 空洞モデル。一次電子放出面のエンドプレート 1 を赤色で示している。左側の数値は一次電子のパラメータである。

⑨-図 5 に電子増殖率対 Eacc のプロットを示す。Eacc が比較的低いところ（図中に赤字で 1～4 と示す）とそれより若干強いところ（5 と 6）の 2 種の場合に増殖率が高いところがあり、それ以上のところでは増殖率が高いところはなさそうだという結果であった。



⑨-図 5. 4 スポーク 325 MHz 空洞モデルの電子増殖率 (growth ratio) vs. Eacc のプロット。縦軸は電子数の増殖率。Eacc が比較的低いところとそれより若干高いところで増殖率が高い。

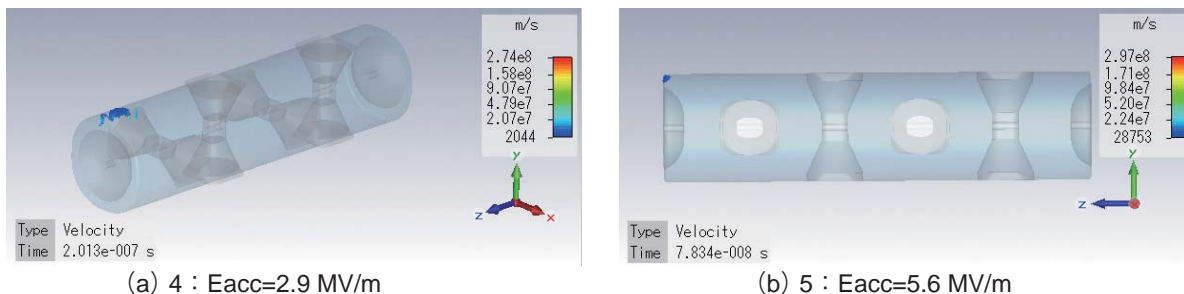
⑨-図 6 に電子数の時間経過のプロットを示す。図中に示す 1～6 までの指標は図 5 で明示したものに对应していて、番号が増えるほど Eacc が高い。Eacc が低い 1～4 までのプロットは電子増殖スピードが比較的遅く、特に 1 と 2 が顕著である。一方 Eacc が一番高い 6 では最も増殖スピードが早いことがわかる。



⑨-図 6. 4 スポーク 325 MHz 空洞モデルの電子数 vs. 時間のプロット。縦軸は電子数。横軸は一次電子放出後の時間。1～6 の番号は⑨-図 5 で示したものと対応している。

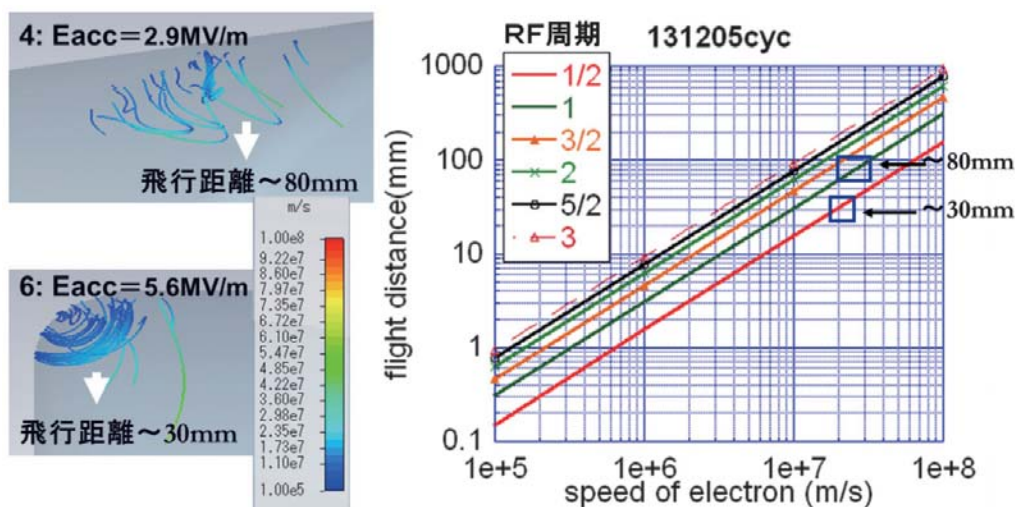
次にMPが発生する場所の特定を行った。結果的には1～4と5～6で異なった現象がみられ、前者はタンク壁の比較的広範囲で起こる“MP もどき”のもの、後者は2点間で起こる典型的なMPでその飛行距離との関係から1/2周期のものであることがわかった。

⑨-図7はこの2種のMPと思われる現象をとらえた電子の軌跡の3Dプロットの代表的なもの。⑨-図7(a)は指標4に、同図(b)は5に対応するもので、どちらの図でも消滅した電子は表示していない。左側の図では壁で、右側の方ではコーナー部で電子集中が起こっていることがわかる。



⑨-図7. MPが疑われる場所の特定。電子軌跡の確認 (a)4: Eacc=2.9 MV/mの場合。エンドプレート1とスポーク4のあいだのタンクの壁上部でMPらしき電子の集中がみられる。(b)5: Eacc=5.6 MV/mの場合。タンクの左隅上部のコーナーでより高い電子の集中がみられMPと判断できる。

⑨-図8に電子の速度、飛行距離、軌跡の様子を調べるのに使った図を示す。MPのモード（レベルともいわれる）を推定するのがここでの目的である。先ず左側の図から説明すると、上のは指標4のEacc = 2.9 MV/m時の電子軌跡を拡大したもので、壁から電子が出て加速し途中で減速し向きを変え再度加速し壁に当たる、ということがタンク壁のある領域において複数の電子で起きている。電子の速度は図からおよそ $2 \sim 3 \times 10^7$ m/sと見積もることができる。電子の飛行距離（壁から出て壁に当たるまで）は図からおよそ80 mmと推定した。飛行軌跡は途中で屈折したようなヘアピン状であることが特徴的である。一方、その下の図は指標6のEacc



⑨-図8. MPのモードの簡易解析。左側には指標4と6の条件での電子軌跡の拡大図を示し、右側には電子の飛行距離 vs. 電子の速度のプロットを示す。

= 5.6 MV/m に対応する電子の軌跡で、円弧を描いているのが特徴的である。ここでもタンク壁から出るときと壁にまた激突するときの速度は比較的遅いが、途中は加速していて図から同様な方法で飛行距離は 30 mm と見積もった。電子の速度は前述のものより低くおよそ $1.7 \sim 2.7 \times 10^7$ m/s 程度である。

これら電子の速度と飛行距離と rf 周期の関係を見出すために⑨-図 8 の右側のグラフを用いた。横軸は電子の速度で所定の 325 MHz の rf 周期で電子の飛行距離がどの程度となるか簡単にみるためのもので、4 の飛行距離は約 80 mm で前述の電子速度と対応する rf 周期は図から 1 周期と推定でき、同様の手法により 6 は 1/2 周期と推定できる。まとめると次のようなことがいえる：(1) 4 は比較的広範囲の領域で起こっていて 1 周期の“MP もどき”の現象である、(2) 6 はより電子の密度が高く 1/2 周期の 2 点間の典型的な MP である。

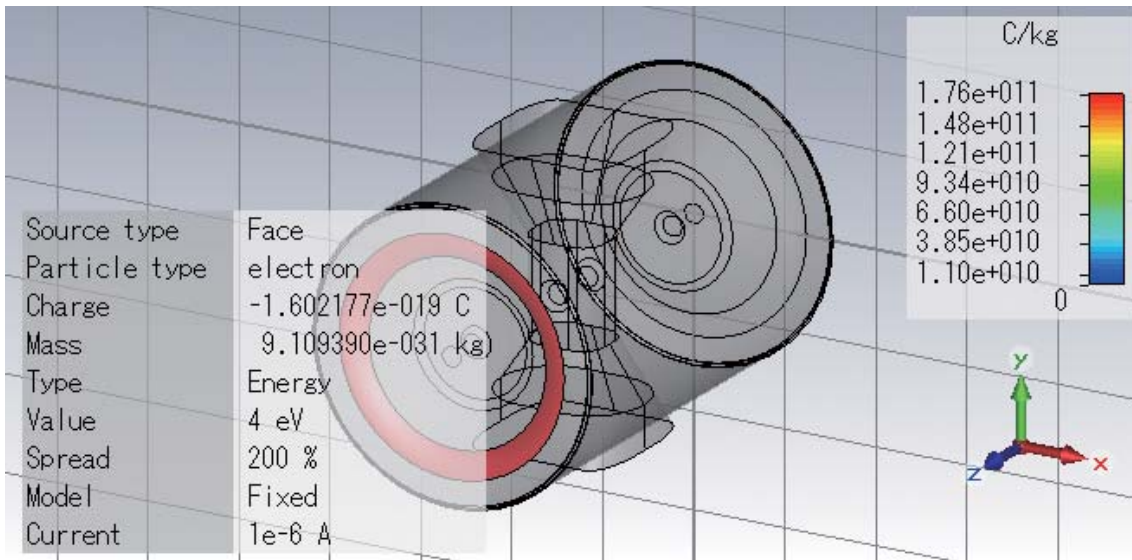
⑨-3.3 シングルスポーク 325 MHz 空洞モデル

このモデルは実際に製作する予定の基本構成を有する。スポークは一本となりタンクの長さは約 1 m と前述モデルと比較して半減している。シミュレーションにあたって一次電子の個数を 100 個前後と先の計算の 400 個から大幅に少なくせざるを得なかった。予備的な前段階の計算で電子の増殖がこれまでのモデルと比較してかなり多いことがわかったため、適当な時間内で計算が終了するよう計算機の能力の都合に合わせたということである。

その他のパラメータは⑨-表 3 に示すよう前述モデルの場合と同様である。⑨-図 9 にシングルスポーク 325 MHz の計算モデルを示す。

⑨-表 3. シングルスポーク 325 MHz 空洞モデルのパラメータ

| | |
|-----------------|------------------------------------|
| fo | 327 MHz |
| Cavity length | 0.92 m |
| Cavity diameter | 0.61 m |
| Eacc | 1.081 MV/m |
| Epeak | 4.047 MV/m |
| Hpeak | 6.174 KA/m |
| R/Q | 484 Ω |
| mesh cell 数 | ～ 11 万 |
| 1 次電子の数 | 108 ～ 109 |
| 放出面 | エンドプレート 1 の外縁 |
| エネルギー | 0 ～ 8eV, 均一分布 |
| Angle spread | 0° |
| 2 次電子放出 | Furman モデル |
| 放出面 | 全ての面 (PEC) |
| TRK 最大ステップ数 | 30000 |
| TRK fields | field factor:0.2 刻みで可変 phase:0° |



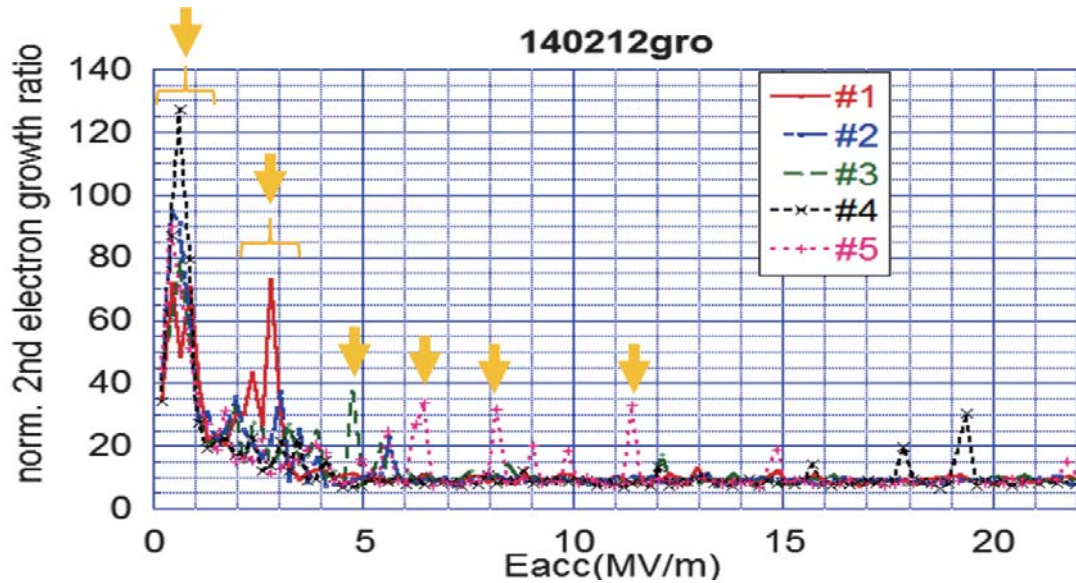
⑨-図 9. シングルスポーク 325 MHz 空洞モデル。一次電子放出面のエンドプレート 1 を赤色で示している。左側の数値は一次電子のパラメータである。スポークが一本になってタンクが短くなっている。

4 スポーク 325 MHz 空洞モデルの結果ではコーナーで MP が発生することがわかったので、ここでの計算はタンクのコーナーの半径を変えて MP 現象に影響が出るか確かめることにした。コーナー R は 5 つ考慮した。⑨-図 10 にその説明図とコーナー R を最小値 2.8 mm から最大値 25.2 mm まで振った #1 ~ #5 のモデルを示した。

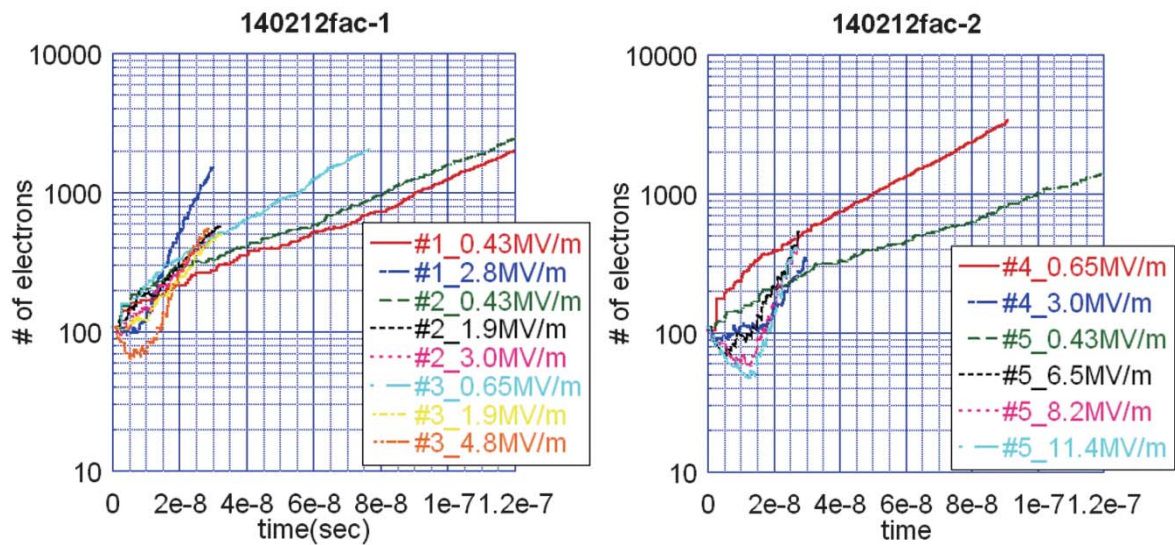


⑨-図 10. シングルスポーク 325 MHz 空洞モデルのコーナー R の定義。コーナー R は最小 2.8 mm から 25.2 mm まで 5 種考慮した。

⑨-図 11 は電子増殖率、⑨-図 12 は電子数の時間経過をプロットしたものである。Eacc が比較的低いところで増殖率が高く、電子数の増加はゆるやかである。Eacc = 3 MV/m 以上では各コーナー R モデルでそれほど顕著な差がみられない。代表的なピークと考えられるところを⑨-図 11 中の黄色矢印で示している。



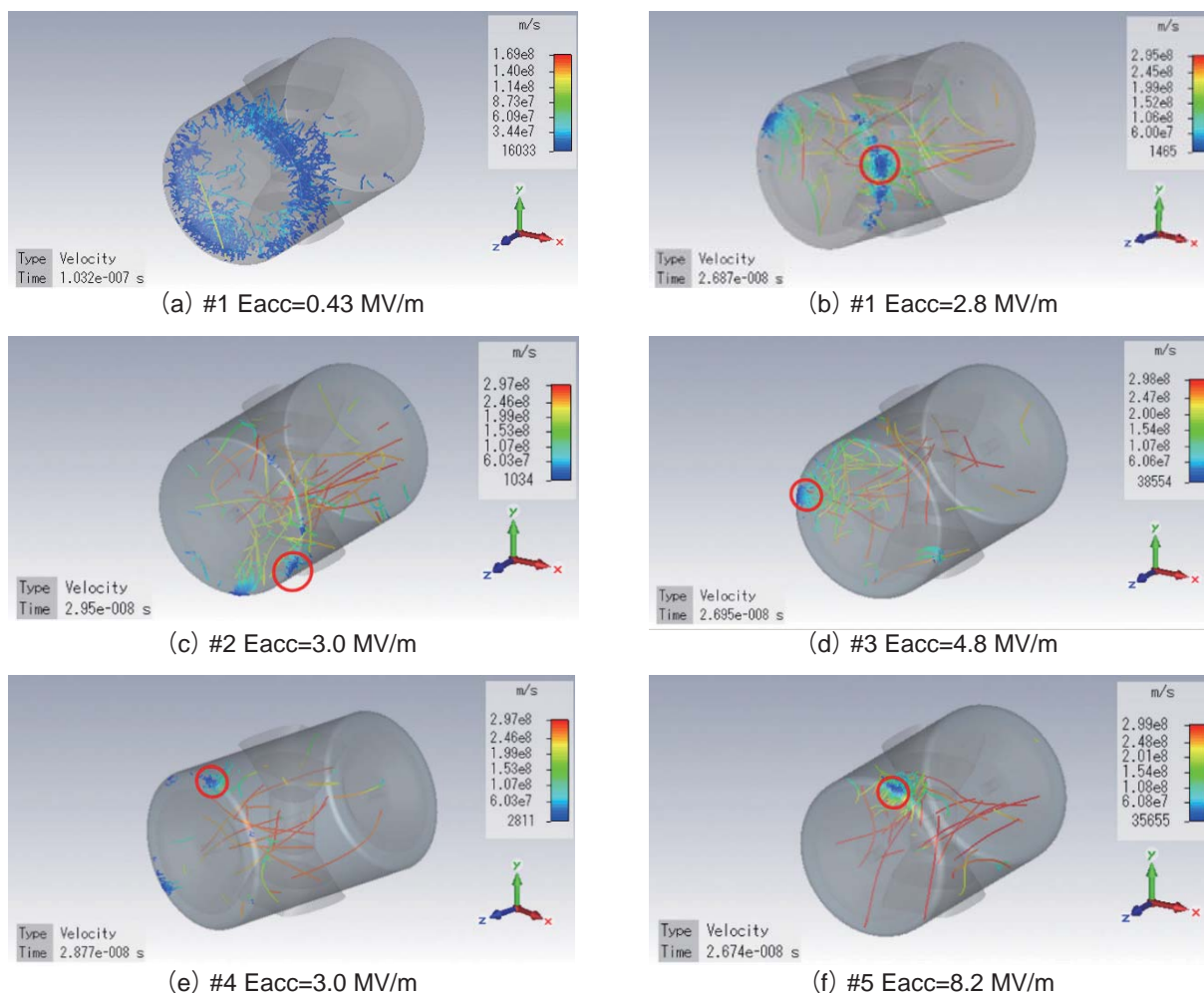
⑨-図 11. シングルスポーク 325 MHz 空洞モデルでの電子増殖率 vs. Eacc のプロット。コーナー R をパラメータとしている。黄色矢印で示すところは特に増殖率が高いと思われるところ。



⑨-図 12. シングルスポーク 325 MHz 空洞モデルでの代表的な電子数 vs. 時間のプロット。

⑨-図 13 に各コーナー R のモデルでの電子増殖率が高いと思われる代表的な Eacc での電子軌跡の 3D プロットを示す。図中で(a)は MP もどきの現象でそれ以外の(b)~(f)は全てにおいて前述モデルで示したような典型的な MP が起きている。したがって今回の計算ではコーナー R の違いで MP の起こりやすさに差をみることはできなかった。

課題としてはシミュレーションでの MP の発生は 1 次電子数のわずかな差でも変わってしまう場合もあったので、1 次電子数を増加させた上でタイムステップ数を増やして（少なくとも 100 周期分）統計的に安定な結果が得られるようにする必要があるのと、さらにコーナー部などでメッシュが若干凸凹しているのがわかっているのでメッシュ数を増やしてモデルの精度をあげることも必要と思われる。



⑨-図 13. シングルスポーク 325 MHz 空洞モデルでの MP の場所の特定：(a)~(f)に #1~#5 のそれぞれのコーナー R での代表的な MP おもわれるものをプロットした。

⑨-4 非破壊検査検討

楕円型空洞では非破壊検査としてはまず、常温、大気中に於ける高分解能内視鏡による空洞内表面の観察が挙げられる。また、極低温冷却時に RF 電力を投入した際に欠陥などにより発生する温度上昇 (T-map) と電界放出による電子が高電界で加速され、それが壁面に衝突されて発生する X 線の分布測定検出 (X-map) も行っている。前者は空洞の構造が違い、検査すべき場所が異なる。スポーク空洞はこれまで経験がある楕円型空洞よりもサイズが大きく、カメラレンズから遠い表面も観測する必要がある。このため、光学部品を補充し、見えにくい表面の観察方法の研究に着手した。一方、必要電界勾配が大きくない場合には多少の欠陥は許容できるという知見も有るため、現状での結論は、空洞の EBW (電子ビーム溶接) 終了後に内視鏡による検査が必要な場合にはカメラが入るような穴が必要であるということに留まる。

T-map, X-map に関してはこれも空洞の構造が違うため、取付方法の変更が必要になる。25 年度は MP による発熱や X 線発生を想定して、取付方法や、電氣的接続の信頼性向上の検討を行った。26 年度以降、空洞の形状などが定まってくればより現実に近い形状での検討が可能になる。

⑨-5 まとめ

- スポーク空洞のマルチパクタリング (MP) 解析を市販のシミュレーションソフトを使って解析する手法を確立し、Eacc が比較的低いところ以外では典型的な 1/2 周期の MP がタンクのコーナー部分で発生する可能性があることがわかった。325 MHz シングルスポークモデルではこのコーナー R の値を変えて MP が起こりにくい条件があるかどうか調査したが今回の条件では見つけることができなかった。
- MP 解析でのシミュレーション作業を効率的に間違いなく進められるようマクロを開発した。
- 今後の課題としては、1) メッシュ数を少なくとも 2～3 倍程度以上に増加させ計算モデルの精度を上げること、2) トラッキング時間 (最大タイムステップ数) を 100 周期分くらいにまで伸ばすこと、3) 1 次電子数を数倍に増やす、などの方策で MP の起こりやすさの判定が容易にできないか試す必要がある。
- 上記の作業が平成 26 年度以降も滞りなく進められるよう、高性能な計算機の整備を行った。
- 空洞形状は JAEA との共同作業で最適化を行うが、ソフトの互換性の向上や、機械設計の効率を上げるため、3D CAD ソフトを導入した。
- 非破壊検査の予備的な検討に着手した。空洞形状の決定を待って、詳細検討を進める。
- SRF2013 に参加して、一部の成果を発表した。この workshop ではマルチパクタリングに関する発表が 11 件あった。この会議の発表件数の総数も最近になって 300 件を越してきていて、世界的に超伝導空洞技術の採用、開発が盛り上がりを見せてきているようだ。特に、その低 RF ロスの特長を活かして CW (連続) 運転を主眼とした計画に使われている。我が国でも開発を進め、世界の先陣を切って加速試験まで持ち込めるよう開発研究を進めたい所である。

⑨-6 参考文献

- [1] G. Romanov, "Simulation of multipacting in HINS accelerating structures with CST particle studio, Proc. Of LINAC08, Victoria, BC, Canada。
- [2] S. Belomestnykh and V. Shemelin, "High- β cavity design – a tutorial", Proc. Of the 12th International workshop on rf superconductivity。
- [3] J. Delayen, "Multipacting analysis of spoke cavities", KEK 研究会「Spoke cavity and related topics」, 2013 年 9 月、非公開。

⑩ 小型高輝度 X 線発生装置を用いた X 線位相イメージング法の開発

(再委託先：国立大学法人東北大学)

概 要

レーザー逆コンプトン散乱 X 線源 (LCS) を用いた X 線位相イメージング実験を開始するにあたり、参画機関である産業技術総合研究所) で稼働可能な LCS を前提に、その光学設計を計算機シミュレーションを活用して行った。X 線源の空間的干渉性の制限を考慮し、X 線 Talbot-Lau 干渉計をコンパクトに構築することにし、それに必要な X 線透過格子 (G1, G2, G0) の設計を行った。次いで、G1 と G2 を製作した。G0 は平成 26 年度に製作する。

⑩-1 はじめに

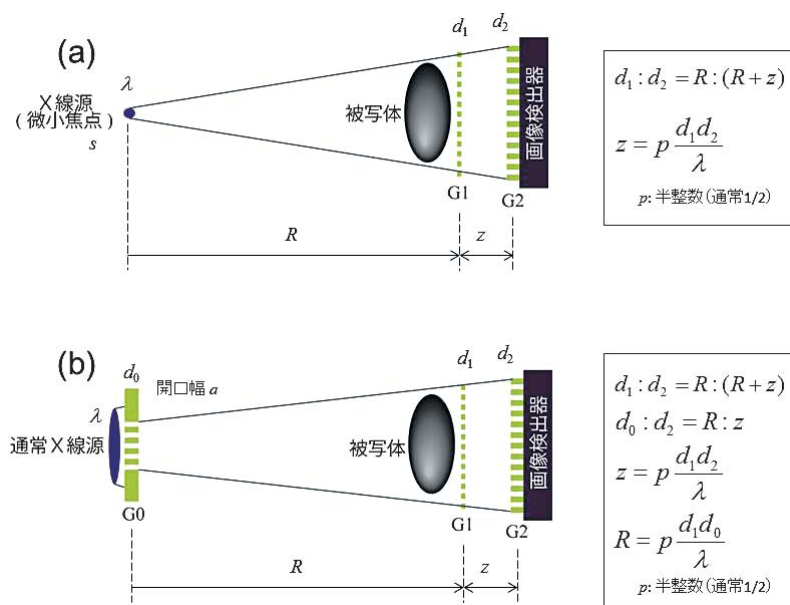
本開発の責任者である百生は、生体軟組織や高分子材料など、主に軽元素からなる物体に効力を発揮する X 線位相イメージングの研究を行ってきた。従来の X 線透視画像では、物質による X 線減衰の大小によってコントラストが形成される。物質の質量吸収係数は、吸収端の影響がある場合を除いて、その原子番号のほぼ 4 乗に比例することが知られている。すなわち、重い元素ほど明瞭なコントラストを形成するが、軽元素からなる物体には X 線画像はあまり有効でない。これは、X 線画像の原理的問題として長く甘受されてきた。X 線位相イメージングは、X 線が物質を透過する際に受ける僅かな X 線の屈折からコントラストを生成する方法であり、上記の問題を克服する手法として、特に 1990 年代前半より研究されてきている。X 線の屈折は位相シフトによって誘起されるが、軽元素についての X 線位相シフトの相互作用断面積が吸収の相互作用断面積より約千倍大きいという事実が基になっている。X 線断層撮影法 (X 線 CT) との組み合わせも可能である (X 線位相 CT)。実際の感度利得は採用する光学方式によるので一概には言えないが、たとえばガンが無造影で描出できることが実験によって示されている。

X 線位相イメージング開発当初は、シンクロトロン放射光を用いて研究が行われた。これは、空間的干渉性の高い高輝度 X 線が利用できることが、この手法にとって有利であったからである。デモンストレーションされた画像は従来の X 線画像の常識を凌駕するものであり、医用画像分野などへの応用を大いに期待させるものであった。しかし、巨大な施設であるシンクロトロン放射光源の使用が前提となつては、本格的な実用化の道筋は決して明瞭なものとはならなかった。

2000 年代に入り、X 線透過格子を用いる X 線 Talbot 干渉計あるいは X 線 Talbot-Lau 干渉計 (⑩-図 1) による位相イメージングが提案され、シンクロトロン放射光を用いなくとも、実験室や病院で稼働している X 線源を用いた装置化が可能であるとして注目された。X 線透過格子には、高アスペクト比で大面積の L&S パターン形成が必要であり、我々は X 線リソグラフィと金メッキによってこの開発に成功した。現在は、これに限らない複数の方法で格子製作が可能となっている。このような格子を用いた医用画像診断機器の開発も進んでいる。軟骨に対する感度を利用した関節リウマチ診断装置が病院にて稼働するに至っており (A. Momose et al., *Phil. Trans. R. Soc. A* 372 (2014) 20130023)、患者撮影によるテストが進行している。乳癌診断 (マンモグラフィ) への適用を目指した装置開発もこれに続いている。

ただし、このような装置は、X線源からの連続X線を使用するものである。このため、病院で使われているX線源を用いた装置化を実現する代わりに、達成可能な画質にはある程度の妥協が強いられている。本プログラムで開発されるLCSは、準単色スペクトルを持つという特徴を有しており、X線位相イメージングに利用すれば、上で述べた装置よりも優れた画質が実現されると期待される。LCSができる限り小型化できることが重要であるが、それが実現すれば、より高度な医用画像診断装置を構成することができるであろう。

本年度は、そのための基盤的光学系の構成を目的として、参画機関（産業技術総合研究所）で稼働しているLCSスペクトルを考慮したX線光学系のシミュレーション検討と、それに基づくX線格子設計・製作を行った。



⑩-図 1. X線 Talbot 干渉計(a)とX線 Talbot-Lau 干渉計(b)の構成および光学配置条件。

⑩-2 開発内容

⑩-2.1 LCS スペクトルを考慮したシミュレーションと格子設計

LCSを用いたX線位相イメージング研究の端緒として、参画機関である産業技術総合研究所で過去に行われたLCS実験に基づき、ほぼ同様の光源構成による最初のX線位相イメージング実験を計画している。そこで、そのスペクトルを前提にX線干渉計のパフォーマンスをシミュレーションによって検討し、その際に使用するX線格子の設計および製作を行った。

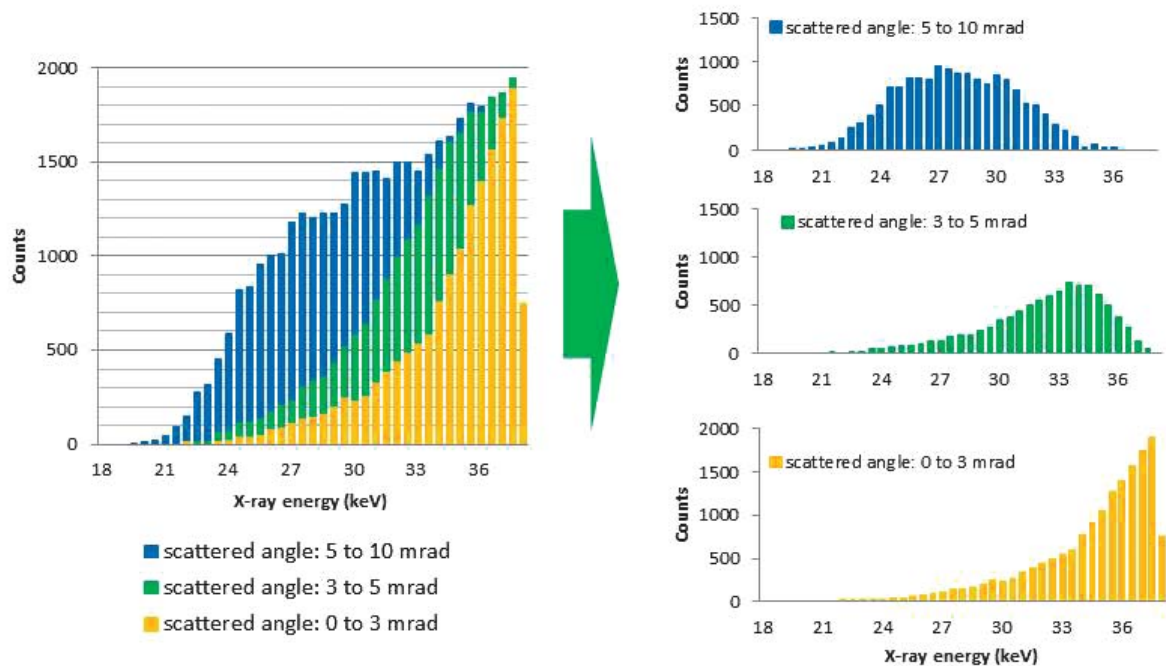
まず、X線 Talbot 干渉計を構築すべきかあるいはX線 Talbot-Lau 干渉計を構築すべきかを決定しなければならない。X線 Talbot 干渉計は、空間的干渉性を有するX線が必要である。具体的には、格子位置における空間的可干渉距離が格子周期程度であることが望ましい。空間的可干渉距離 (L) はLCS光源の大きさ (s 、ガウシアンと近似した場合の標準偏差) とLCS光源からの距離 (R) で決まり (⑩-図 1(a)参照)、 $L = \lambda R / 2\pi s$ で与えられる。干渉計が機能するための条件としては、 $L > d_1/2$ が要求される。ここで、 λ はX線の波長、 d_1 は格子の周期である。産

業技術総合研究所で構成可能な LCS 光源の仕様によれば、光源の大きさは小さくても $40\ \mu\text{m}$ と想定され、加速器の X 線取り出し真空窓までの距離を $2\ \text{m}$ と考えると、 $30\ \text{keV}$ の準単色 X 線を想定して、空間的可干渉距離は $L = 0.77\ \mu\text{m}$ と計算できる。一方、サブミクロン周期で現実的な面積を持つ X 線格子は現時点で製作不可能と考えられ、これまで開発してきた $5\ \mu\text{m}$ 前後の周期を持つ格子で実験を計画する必要がある。したがって、ここでは X 線 Talbot 干渉計を動作させることはできないと結論した。

そこで、⑩-図 1(b)に示す X 線 Talbot-Lau 干渉計を構成することになる。これは、空間的干渉性が不十分な（サイズが大きい）X 線源の使用を可能にするが、X 線 Talbot 干渉計を構成する 2 枚の格子 ($G1$ & $G2$) に加えて 3 枚目の格子 ($G0$) を配置する。 $G0$ は、下流に設置されている Talbot 干渉計に対して、コントラストを消滅させないように X 線源から縞状の領域のみを選び取る働きを有する。こうすることにより、X 線 Talbot 干渉計と同様に X 線位相イメージングが可能となる。ただし、撮影上の空間分解能は光源サイズに依存するので、X 線 Talbot 干渉計に比べて X 線 Talbot-Lau 干渉計で達成できる空間分解能が低いことは甘受せねばならない。

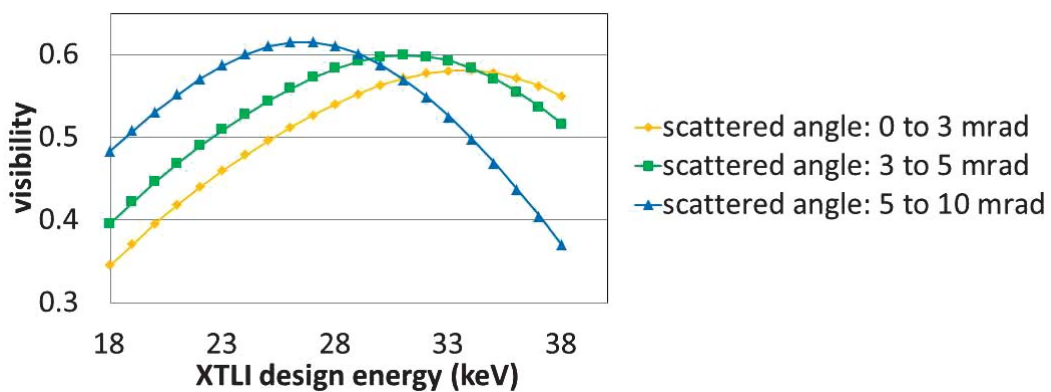
さて、⑩-図 1 に示した光学配置のための条件式には、X 線の波長 λ が含まれている。すなわち、波長が変わると最適配置も変わる。しかし、この条件式を満たさなくても、微妙なパラメータ範囲内で干渉計として機能することが重要な特徴である。条件式の波長から外れたスペクトル成分であってもコントラスト形成には寄与し、その寄与度は条件波長から外れるほど小さくなる。理論的にはエネルギーバンド幅 ($\Delta E/E$) が $1/8$ 程度であれば単色 X 線の場合とほぼ同等なパフォーマンスが得られることがわかる。通常の X 線源からの連続 X 線スペクトルでは、高エネルギー側においては X 線管への印加電圧に対応するカットオフがあり、低エネルギー側は、空気や窓材およびフィルターなどによる減衰効果で除去されている。その結果、バンド幅はおよそ 1 となっている。この場合は、X 線 Talbot-Lau 干渉計で生成されるモアレ縞の鮮明度が半分程度に低下するが、それでも位相イメージングは十分に可能である。ただし、相応の画質低下には妥協している。一方、LCS は準単色 X 線源であるので、上記のようにスペクトル分布に依存するパフォーマンス損失をあまり心配する必要がない。このように LCS と X 線 Talbot (-Lau) 干渉計は技術的に非常に相性が良く、LCS からのほぼすべての X 線を X 線位相イメージングに利用できる。

ただし、厳密には、光軸からの角度 (ϕ) に依存して LCS のスペクトルは変化する。⑩-図 2 に、参画機関（産業技術総合研究所、黒田隆之助博士）より提供されたスペクトルのシミュレーション結果を示した。ここでは、 $\phi = 0 \sim 3\ \text{mrad}$, $3 \sim 5\ \text{mrad}$, $5 \sim 10\ \text{mrad}$ の三つの領域に分けてスペクトルが表示されている。これは、画面の中心からの距離に応じて、画面に到達する X 線のエネルギーが低くなることを示している。光源からの距離を $2\ \text{m}$ とした場合、これらの角度範囲を撮影視野に換算すると、それぞれおよそ $15\ \text{mm}$ 径、 $25\ \text{mm}$ 径、 $50\ \text{mm}$ 径に対応する。ただし、X 線 Talbot-Lau 干渉計を構成する場合、一つの設計波長を選ばなければならないので、いずれにしても画面の中心からの距離に応じて、画質がやや変わると考えられる。ただし、コントラストが得られなくなるほどの激しい変化ではないので、実際の画角の大きさを鑑みて、設計波長を選考するのが妥当である。



⑩-図 2. LCS のスペクトルの例。Electron energy : 40 MeV、Energy spread (rms) : 0.2%、Laser wavelength : 800 nm、Wavelength spread (rms) : 0.4%、collision angle : 10 deg。

⑩-図 3 は、Talbot-Lau 干渉計が生成するモアレ縞の visibility を各角度領域について計算したものである。X線位相イメージングの画質は、visibility がよいほど高いので、各角度領域に最適な設計波長（デザインエネルギー）が異なるのがわかる。このシミュレーションでは、⑩-表 1 に示す格子の仕様を前提としている。

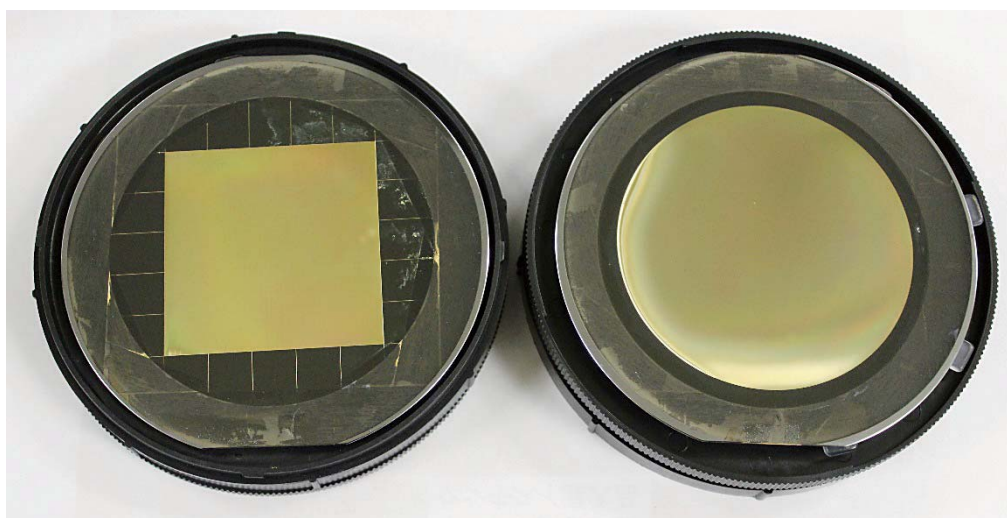


⑩-図 3. 各散乱角度領域における visibility の design energy 依存性。

⑩-表 1. LCS を用いた X線 Talbot-Lau 干渉計用格子の仕様。

| | 格子デザイン | 周期 [μm] | 面積 [mm^2] | 材質 | パターン高さ [μm] | Duty 比 |
|----|------------|----------------------|----------------------|----|--------------------------|--------|
| G0 | Bridge | 5.55 | 50 × 50 | Au | 50 or higher | 0.74 |
| G1 | Continuous | 3.57 | 50 × 50 | Ni | 5.23 | 0.5 |
| G2 | Bridge | 7.49 | ϕ 70 | Au | 100 | 0.5 |

⑩-表 1 のデザインでは、⑩-図 3 から 30 keV をデザインエネルギー（設計波長 0.041 nm）とすれば全視野で十分な画質が得られると考えて選んだ。G0 と G2 は振幅格子であり、X線をストライプ状に吸収できるように金をできるだけ高く形成するものである。G1 は位相格子であり、そのパターン高さは、30 keV の X 線に対して、位相シフト $\pi/2$ を与えるように選んでいる。ここでは、全体の光学系がコンパクトになるように格子周期を選んでいる。光学設計上は、対象配置、すなわち $z = R$ （⑩-図 1 参照）とすると全長 ($z + R$) が短くできる。このとき、撮影感度も最も高くなることがわかっている。ただし、⑩-表 1 記載の仕様は厳密には対称とはなっていない。これは、平成 25 年度に本開発のための格子を製作するに当たり、既存マスクの活用による低コスト化を鑑みてのことである。⑩-表 1 は、ドイツカールスルーエ技術研究所に製作を依頼し、現有のマスクから最も理想配置に近くなる組み合わせを選択した結果である。⑩-図 4 に製作した G1 および G2 の写真を示す。なお、G0 については新規のマスクによるものであるため予算上盛り込むことができなかった。平成 26 年度に製作を行う予定である。



⑩-図 4. 製作した G1 格子（左）と G2 格子（右）

⑩-3 まとめ

LCS による X 線位相イメージング実験を実施するために必要な光学設計を計算機シミュレーションを用いて行い、まず、X 線 Talbot-Lau 干渉計構成による実験が望ましいことを示し、それに必要な X 線透過格子（G1, G2, G0）の設計を示した。特に、全体がコンパクトになる仕様を考慮した。この設計に基づき、G1 および G2 を製作した。G0 については、平成 26 年度予算によって製作する。

⑪ プロジェクトの総合的推進

KEK は本研究課題全体を円滑に運営していくため、本事業の PO 及び PD との連絡を密にとりつつ、各参画機関の連携・調整を行った。その為には本課題全体打合せを2ヶ月に1度、各機関持ち回りで行った。また、課題間の連携強化、研究者間の交流促進を図る為、他課題と分担して課題間連絡会議等の連絡調整、運営、支援を行う。プロジェクトで得られた成果については、積極的に公表し、今後の展開に資する。

本課題の全体会議を以下のように開催した。

| | | | | |
|------------|---------|-------|-----------|----------------|
| 2013.08.19 | 第2回全体会議 | 東北大学 | 片平キャンパス | 片平北門会館 2F |
| 2013.10.15 | 第3回全体会議 | 広島大学 | | 学士会館 会議室 1 |
| 2013.12.10 | 第4回全体会議 | 早稲田大学 | 西早稲田キャンパス | 62W 号館 1F 会議室 |
| 2014.02.20 | 第5回全体会議 | 京都大学 | 化学研究所 | イオン線型加速器実験棟会議室 |

これらの会議での報告書等は <http://nkocbeam.kek.jp/schedule/index.html> の Web で閲覧可能である。主に各機関の研究開発状況と計画に関する意見交換および各機関間の協力に関する調整を行った。特に東北大学、産業技術総合研究所、リガク（株）が行う位相コントラスト X 線イメージング取得共同実験計画を話し合い、平成26年5月に実験が開始できる状況になった。また、レーザー開発に関する早稲田大学と KEK 間の調整や 20 K クライオ高周波電子銃開発に関する日本大学と KEK 間の調整も行った。JAEA と京都大学の 4 K 325 MHz スポーク超伝導空洞開発および広島大学と KEK との光共振器開発は別途共同打合せにより意見交換と共同実験を順調に進めている。広島大学と JAEA が進めているマルチアルカリ光カソード開発も蒸着装置やカソード移送装置の製作がほぼ完了し、平成26年度から試験実験に使える状況になっている。これらの研究開発状況は本全体会議を通して適切な判断により実現できている。

また、本プロジェクトに関連する報告を年度毎に <http://nkocbeam.kek.jp/report/> に整理して、関係者が常に見ることができるようにした。これら以外に KEK では対外的な情報交換を行う為の以下の打ち合わせや研究会を行った。

定例小型 X 線源実験打ち合せ

| | | |
|------------|------------------------------|-------------|
| 2013.08.08 | 小型 X 線源実験打ち合せ (LUCX Meeting) | KEK-LC コンテナ |
| 2013.08.22 | 小型 X 線源実験打ち合せ (LUCX Meeting) | KEK-LC コンテナ |
| 2013.09.05 | 小型 X 線源実験打ち合せ (LUCX Meeting) | KEK-LC コンテナ |
| 2013.09.19 | 小型 X 線源実験打ち合せ (LUCX Meeting) | KEK-LC コンテナ |
| 2013.10.03 | 小型 X 線源実験打ち合せ (LUCX Meeting) | KEK-LC コンテナ |
| 2013.10.17 | 小型 X 線源実験打ち合せ (LUCX Meeting) | KEK-LC コンテナ |
| 2013.10.24 | 小型 X 線源実験打ち合せ (LUCX Meeting) | KEK-LC コンテナ |
| 2013.10.31 | 小型 X 線源実験打ち合せ (LUCX Meeting) | KEK-LC コンテナ |
| 2013.11.07 | 小型 X 線源実験打ち合せ (LUCX Meeting) | KEK-LC コンテナ |
| 2013.11.21 | 小型 X 線源実験打ち合せ (LUCX Meeting) | KEK-LC コンテナ |
| 2013.12.12 | 小型 X 線源実験打ち合せ (LUCX Meeting) | KEK-LC コンテナ |

| | | |
|------------|------------------------------|-------------|
| 2013.12.19 | 小型 X 線源実験打ち合せ (LUCX Meeting) | KEK-LC コンテナ |
| 2013.12.26 | 小型 X 線源実験打ち合せ (LUCX Meeting) | KEK-LC コンテナ |
| 2014.02.06 | 小型 X 線源実験打ち合せ (LUCX Meeting) | KEK-LC コンテナ |
| 2014.02.27 | 小型 X 線源実験打ち合せ (LUCX Meeting) | KEK-LC コンテナ |
| 2014.03.06 | 小型 X 線源実験打ち合せ (LUCX Meeting) | KEK-LC コンテナ |
| 2014.03.13 | 小型 X 線源実験打ち合せ (LUCX Meeting) | KEK-LC コンテナ |
| 2014.03.20 | 小型 X 線源実験打ち合せ (LUCX Meeting) | KEK-LC コンテナ |

研究会

| | | |
|------------|---------------------------------|--------------|
| 2013.09.02 | Spoke Cavity and Related Topics | KEK 2 号館会議室中 |
| 2014.01.31 | Mini-Workshop | KEK セミナーホール |

2.3 成果の外部への発表

2.3.1 学会等における口頭・ポスター発表

| 発表した成果 (発表題目、口頭・ ポスター発表の別) | 発表者氏名 | 発表した場所 (学会等名) | 発表した 時期 | 国内・ 外の別 | 本委託費によ る成果か ○：ほぼ全て △：一部 |
|---|--|---------------------|-------------|------------|----------------------------------|
| 量子ビーム基盤技術 開発プログラムにお ける STF 加速器での X 線生成実験報告(口 頭) | 清水 洋孝, 明本 光生, Alex Aryshev, 荒木 栄, 福田 将史, 早野 仁司, 本田 洋介, 久保 浄, 黒 田 茂, 松本 利広, 三好 敏善, 内藤 孝, 奥木 敏 行, 大森 恒彦, 阪井 寛 志, 田内 利明, 照沼 信 浩, 浦川 順治, 渡邊 謙 (高エネ研), 坂上 和之 (早稲田理工学部), 細 田 誠一, 飯島 北斗, 栗 木 雅夫(広島大先端研), 磯山 悟朗, 加藤 龍好, 川瀬 啓悟(阪大産研), Arpit Rawanka(総研大), 他 | 日本加速器学会年 会、名古屋大学 | 平成 25 年 8 月 | 国内 | ○ |
| 光蓄積共振器を用い たレーザーコンプト ン散乱 X 線源の開発 (口頭) | 坂上 和之, 鷺尾 方 一, 荒木 栄, Aryshev Alexander, 浦川 順治, 照沼 信浩, 福田 将史, 三好 敏喜 | 日本加速器学会年 会、名古屋大学 | 平成 25 年 8 月 | 国内 | ○ |
| Lバンドフォトカ ソード RF 電子銃の開 発 (VII) (ポスター) | 川瀬 啓悟, 加藤 龍好, 藤本 将輝, 上司 文善, 大角 寛樹, 矢口 雅貴, 船越 壮亮, 堤 亮太, 磯 山 悟朗, 渡邊 謙, 倉本 綾佳, 早野 仁司, 浦川 順治, 高富 俊和, 飯島 北斗, 栗木 雅夫, 柏木 茂 | 日本加速器学会年 会、名古屋大学 | 平成 25 年 8 月 | 国内 | ○ |
| ATF Damping Ring の 周長変化 (ポスター) | 内藤 孝, 荒木 栄, 浦川 順治, 奥木 俊行, 久保 浄, 黒田 茂, 照沼 信浩 | 日本加速器学会年 会、名古屋大学 | 平成 25 年 8 月 | 国内 | △ |
| 極短バンチ計測用 2Cell 型 RF-Deflector に関する研究 (ポス ター) | 高橋 猛之進, 西村 祐一, 西山 将大, 坂上 和之, 鷺尾 方一, 高富 俊和, 浦川 順治 | 日本加速器学会年 会、名古屋大学 | 平成 25 年 8 月 | 国内 | △ |
| KEK 小型電子加速器 (LUCX) の現状報告 (6) (ポスター) | 福田 将史, 荒木 栄, Aryshev Alexander, 浦川 順治, 照沼 信浩, 本田 洋介(高工研), 坂上 和 之, 鷺尾 方一 | 日本加速器学会年 会、名古屋大学 | 平成 25 年 8 月 | 国内 | ○ |

| 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 | 本委託費によ る成果か ○：ほぼ全て △：一部 |
|--|--|------------------------------|-------------|------------|----------------------------------|
| Performance Study of Four Mirror Laser Res- onator for 6 um Mini- mum Beam Size using Green Laser Oscillator (ポスター) | Arpit Rawankar, Junji Urakawa, Hiroataka Shi- mizu, Nobuhiro Terunuma, Yosuke Honda | 日本加速器学会年 会、名古屋大学 | 平成 25 年 8 月 | 国内 | △ |
| フォトカソード高周 波電子銃による極短 バンチ生成実験 (ポ スター) | 水柿 将貴, 小柴 裕也, 坂上 和之, 鷲尾 方一, 高富 俊和, 浦川 順治, 黒田 隆之助 | 日本加速器学会年 会、名古屋大学 | 平成 25 年 8 月 | 国内 | △ |
| Development of ad- vanced THz generation schemes at KEK LUCX facility (ポスター) | Alexander Aryshev, Sakai Araki, Masafumi Fukuda, Konstantin Lekomtsev, Mikhail Shevelev, Junji Urakawa, Alexander Poty- litsyn, | 日本加速器学会年 会、名古屋大学 | 平成 25 年 8 月 | 国内 | △ |
| RF 電子銃を用いた フェムト秒時間分解 電子顕微鏡の開発(口 頭) | 楊 金峰, 菅 晃一, 近藤 孝文, 成瀬 延康, 吉田 陽一, 谷村 克己, 浦川 順治 | 日本加速器学会年 会、名古屋大学 | 平成 25 年 8 月 | 国内 | △ |
| CsK ₂ Sb 光陰極の電子 引き出し寿命に関 する研究(口頭) | 山本記史、栗木雅夫、 郭磊 | 日本加速器学会年 会、名古屋大学 | 平成 25 年 8 月 | 国内 | ○ |
| Development of longi- tudinal profile monitor for ultra-short electron beam using EO sam- pling method (口頭) | R. Kuroda, Y. Taira et al., | FEL2013、ニュー ヨーク | 平成 25 年 8 月 | 国外 | △ |
| 偏極陽電子源の為の レーザー蓄積共振器 の改良(口頭) | 田中龍太, 赤木智哉, 荒木栄, 浦川順治, 大 森恒彦, 奥木敏行, 栗 木雅夫, 坂上和之, 清 水洋孝, 高橋徹, 照沼 信浩, 舟橋義聖, 本田 洋介, 鷲尾方一 | 日本物理学会 2013 年秋季大会、 高知市 | 平成 25 年 9 月 | 国内 | ○ |
| レーザー干渉型新竹 モニターを用いた nm 電子ビームサイズの 収束と測定(口頭) | ジャクリンヤン, 駒宮 幸男, 神谷好郎, 大録 誠広, 山口洋平, 山中 隆志, 末原大幹, 照沼 信浩, 田内利明, 久保淨, 奥木敏行, 荒木栄, 浦 川順治 | 日本物理学会 2013 年秋季大会、 高知市 | 平成 25 年 9 月 | 国内 | △ |
| 高輝度 LCS ガンマ 線生成のためのレー ザー蓄積キャビティ の開発(口頭) | 浦川順治 | 日本物理学会 2013 年秋季大会、 高知市 | 平成 25 年 9 月 | 国内 | ○ |

| 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 | 本委託費による 成果か ○：ほぼ全て △：一部 |
|--|---|---|-------------|------------|----------------------------------|
| 超伝導加速器用同軸 導波管型 HOM カッ プラーの設計 (口頭) | 沢村 勝 | 日本原子力学会秋 の大会 | 平成 25 年 9 月 | 国内 | △ |
| High brightness Beam Generation with a photo-cathode 500 kV DC gun (口頭) | M. Kuriki, Y. Seimiya, N. Nishimori, R. Nagai, S. Matsuba, R. Hajima, M. Yamamoto, Y. Honda, T. Miyajima, H. Iijima, M. Kuwahara | International Work- shop on Polarized Positron (POSI- POL), Argonne National Labora- tory, USA | 平成 25 年 9 月 | 国外 | △ |
| Update of R&D Opti- cal Cvities at KEK-ATF (口頭) | Tohru Takahashi | International Work- shop on Polarized Positron (POSI- POL), Argonne National Labora- tory, USA | 平成 25 年 9 月 | 国外 | ○ |
| 300 Hz Linac Hardware Upgrade (口頭) | Junji Urakawa | International Work- shop on Polarized Positron (POSI- POL), Argonne National Labora- tory, USA | 平成 25 年 9 月 | 国外 | △ |
| New QB Program (Fun- damental Technology Development for High Brightness X-ray Source and the Imaging by Compact Accelerator under Pho- ton and Quantum Basic Research Coordinated Development Program) (口頭) | Junji Urakawa | International Work- shop on Polarized Positron (POSI- POL), Argonne National Labora- tory, USA | 平成 25 年 9 月 | 国外 | ○ |
| Overview and Target R&D of 300 Hz Con- ventional e ⁺ Source for ILC (口頭) | T. Omori | International Work- shop on Polarized Positron (POSI- POL), Argonne National Labora- tory, USA | 平成 25 年 9 月 | 国外 | △ |
| New Design of HOM Coupler using Coaxial- like Rounded Wave- guide (ポスター) | 沢村 勝, 永井 良治, 西森 信行, 羽島 良一 | The 16th Inter- national confer- ence on RF Su- perconductivity (SRF2013), Paris, France | 平成 25 年 9 月 | 国外 | △ |
| XT-MAP SYSTEM FOR LOCATING SC CAVITY QUENCH POSITION (ポスター) | H. Tongu, Y. Iwashita, H. Hayano, Y. Yamamoto | SRF2013, Paris, France | 平成 25 年 9 月 | 国外 | △ |

| 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 | 本委託費によ る成果か ○：ほぼ全て △：一部 |
|--|--|---|--------------|------------|----------------------------------|
| Update on Study of Welding Porosity in b EBW (ポスター) | Iwashita,Y.; Tongu,H.;Hayano,H. | SRF2013, Paris, France | 平成 25 年 9 月 | 国外 | △ |
| DC photoemission gun development for the compact ERL (口頭) | N. Nishimori, R. Nagai, S. Matsuba, R. Hajima, M. Yamamoto, Y. Honda, T. Miyajima, H. Iijima, M. Kuriki, M. Kuwahara | The 53th ICFA Advanced Beam Dynamics Work- shop on "Energy Reciver Linacs" (ERL2013), Novo- sibirsk, Russia | 平成 25 年 9 月 | 国外 | △ |
| Development of a Com- pact X-Ray Source via Laser-Compton Scatter- ing (ポスター) | K. Sakaue, M. Washio, S. Araki, M. Fukuda, N. Terunuma, J. Urakawa | 2013 IEEE Nuclear Science Sympo- sium, Seoul, Korea | 平成 25 年 10 月 | 国外 | ○ |
| Update of R&D Opti- cal Cvities at KEK-ATF (口頭) | Tohru Takahashi | LCWS2013、東京 | 平成 25 年 11 月 | 国内 | ○ |
| Status of R&D of Opti- cal Cvities at KEK-ATF (口頭) | Tohru Takahashi | LCWS2013、東京 | 平成 25 年 11 月 | 国内 | ○ |
| New QB Beam project based on Laser-Com- pton photon generation (口頭) | Junji Urakawa | LCWS2013、東京 | 平成 25 年 11 月 | 国内 | ○ |
| Beam loading compen- sation 300Hz positron generation (口頭) | Junji Urakawa | LCWS2013、東京 | 平成 25 年 11 月 | 国内 | △ |
| The Experimental Plan on Heavy Beam Load- ing Compensation for ILC Conventional Posi- tron Source (口頭) | Junji Urakawa | 平成 25 年ビーム 物理研究会、沖縄 OIST | 平成 25 年 11 月 | 国内 | △ |
| Robust and High Quan- tum Efficiency Photo- cathode Development (口頭) | M. Kuriki, Y. Seimiya | Asian Forum of Accelerator and Detector、メルボ ルン | 平成 26 年 1 月 | 国外 | ○ |
| Status of Compact X- ray source at LUCX (口 頭) | K. Sakaue | Asian Forum of Accelerator and Detector、メルボ ルン | 平成 26 年 1 月 | 国外 | ○ |
| Development of Quan- tum Radiation Sources on the basis of an Short- pulse electron linac and Its applications (口頭) | R. Kuroda, Y. Taira et al., | Asian Forum of Accelerator and Detector、メルボ ルン | 平成 26 年 1 月 | 国外 | ○ |

| 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 | 本委託費によ る成果か ○：ほぼ全て △：一部 |
|--|---|---|-------------|------------|----------------------------------|
| Optical Cavity Development for Compact X-ray Source (口頭) | Junji Urakawa | Asian Forum of Accelerator and Detector、メルボルン | 平成 26 年 1 月 | 国外 | ○ |
| Recent Progress of Accelerator Facility at Waseda University (口頭) | Masakazu Washio, Kazuyuki Sakaue, Yuji Hosaka, Mizuki Sakamoto, Yuya Koshiba, Masataka Mizugaki | Trombay Symposium on Raditaion & Photochemistry (TSRP2014)、Mumbai, India | 平成 26 年 1 月 | 国外 | △ |
| 先端加速器と産業応用 (口頭) | 黒田隆之助, 平義隆 他 | 先端加速器科学技術推進シンポジウム、つくば市 | 平成 26 年 1 月 | 国内 | ○ |
| Effect of the X-ray beam achromaticity on the sensitivity of X-ray Talbot interferometry in detecting the X-ray differential phase shift: A comparison between the employment of pi and pi/2 phase gratings (ポスター) | Margie P. Olbinado, Patrik Vagovic, Wataru Yashiro, Atsushi Momose | 2rd International Workshop on X-ray and Neutron Phase Imaging with Gratings (XNPIG) | 平成 26 年 1 月 | 国外 | ○ |
| DESIGN OF ERL SPOKE CAVITY FOR NON-DESTRUCTIVE ASSAY RESEARCH (ポスター) | 沢村 勝, 永井 良治, 西森 信行, 羽島 良一 | Nuclear Physics and Gamma-ray sources for Nuclear Security and Non-proliferation, Tokai, Ibaraki, Japan | 平成 26 年 1 月 | 国内 | ○ |
| Development of a high-brightness and high-current electron gun for high-flux γ -ray generation (ポスター) | N. Nishimori, R. Nagai, S. Matsuba, R. Hajima, M. Yamamoto, Y. Honda, T. Miyajima, M. Kuriki | Nuclear Physics and Gamma-ray sources for Nuclear Security and Non-proliferation, Tokai, Ibaraki, Japan | 平成 26 年 1 月 | 国内 | ○ |
| The Overview of Optical Cavity R&D for γ -ray Generation based on Inverse Compton Scattering (口頭) | Junji Urakawa | Nuclear Physics and Gamma-ray sources for Nuclear Security and Non-proliferation, Tokai, Ibaraki, Japan | 平成 26 年 1 月 | 国内 | ○ |
| Consideration on future applications for high brightness γ -ray (口頭) | Junji Urakawa | Mini-Workshop on Advanced Accelerator and Laser Technologies for New Generation Light Sources, KEK | 平成 26 年 1 月 | 国内 | ○ |

| 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 | 本委託費によ る成果か ○：ほぼ全て △：一部 |
|--|---|---|-------------|------------|----------------------------------|
| Status of the 500 kV DC photocathode gun at the compact ERL (招待 講演) | N. Nishimori, R. Nagai, S. Matsuba, R. Hajima, M. Yamamoto, Y. Honda, T. Miyajima, T. Uchiyama, M. Kuriki | The International Workshop on Ac- celerator Science and Technology for Electron Ion Col- lider (EIC14), New- port News, USA | 平成 26 年 3 月 | 国外 | △ |
| 325 MHz 超伝導ス ポーク空洞の機械設 計(口頭) | 沢村 勝, 永井良治, 西森 信行, 羽島 良一, 岩下芳久, 藤澤 博 | 日本原子力学会春 の年会 | 平成 26 年 3 月 | 国内 | ○ |
| レーザーコンプトン 散乱による小型高輝 度光子ビーム源の開 発(口頭) | 上杉祐貴, 赤木智哉, 荒木栄, 浦川順治, 大 森恒彦, 奥木敏行, 栗 木雅夫, 坂上和之, 清 水洋孝, 高橋徹, 田中 龍太, 照沼信浩, 舟橋 義聖, 本田洋介, 鷺尾 方一 | 日本物理学会 第 69 回年次大会、 平塚市 | 平成 26 年 3 月 | 国内 | ○ |
| クライオ光陰極高周 波電子銃の研究開発 (口頭) | 境武志, 田中俊成, 中 尾圭佐, 野上杏子, 稲 垣学, 新富孝和, 浦川 順治, 吉田光宏, 高富 俊和 | 日本物理学会 第 69 回年次大会、 平塚市 | 平成 26 年 3 月 | 国内 | ○ |
| KEK 小型電子加速器 におけるレーザー蓄 積装置を用いた小型 X 線源 (LUCX) の開 発 (14) (口頭) | 福田将史, 赤木智 哉, 荒木栄, Alexander Aryshev, 浦川順治, 坂 上和之, 照沼信浩, 本 田洋介, 鷺尾方一 | 日本物理学会 2014 年春季大会、 平塚市 | 平成 26 年 3 月 | 国内 | ○ |
| KEK 小型電子加速器 におけるレーザー蓄 積装置を用いた小型 X 線源 (LUCX) の開 発 (15) (口頭) | 坂上和之, 荒木栄, Alexander Aryshev, 浦川 順治, 照沼信浩, 福田 将史, 本田洋介, 鷺尾 方一 | 日本物理学会 2014 年春季大会、 平塚市 | 平成 26 年 3 月 | 国内 | ○ |
| 電子ビームの時間構 造計測のための 2 Cell RF-Deflector 開発 (口 頭) | 西山将大, 西村祐一, 高橋猛之進, 坂上和之, 鷺尾方一, 高富俊和, 浦川順治 | 日本物理学会 2014 年春季大会、 平塚市 | 平成 26 年 3 月 | 国内 | △ |
| 電子ビームドライブ 方式による ILC 陽 電子捕獲シミュレー ション (口頭) | 清宮裕史, 栗木雅夫, 中牟田亮, 奥木敏行, 浦川順治, 佐藤政則 | 日本物理学会 2014 年春季大会、 平塚市 | 平成 26 年 3 月 | 国内 | △ |
| レーザー干渉型新竹 モニターの性能評価 と nm 電子ビームサ イズの測定 (口頭) | ジャクリンヤン, 駒宮 幸男, 神谷好郎, 照沼 信浩, 田内利明, 久保淨, 奥木敏行, 浦川順治 | 日本物理学会 2014 年春季大会、 平塚市 | 平成 26 年 3 月 | 国内 | △ |

2.3.2 学会誌・雑誌等における論文掲載

| 掲載した論文 (発表題目) | 発表者氏名 | 発表した場所 (学会等名) | 発表した 時期 | 国内・ 外の別 | 本委託費による 成果か ○：ほぼ全て △：一部 |
|---|---|--|--------------|------------|----------------------------------|
| Development of a three dimensional four mirror optical cavity for laser-Compton scattering | T. Akagi, S. Araki, Y. Funahashi, Y. Honda, H. Kataoka, T. Kon, S. Miyoshi, T. Okugi, T. Omori, K. Sakaue, H. Shimizu, T. Takahashi, R. Tanaka, N. Terunuma, J. Urakawa, M. Washio, H. Yoshitama | Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:724(2013)63-71 | 平成 25 年 10 月 | 国外 | ○ |
| A metrology system for a high resolution cavity beam position monitor system | Sean Walston, Stewart Boogert, Carl Chung, Pete Fitos, Joe Frisch, Jeff Gronberg, Hitoshi Hayano, Shantell Hinton, Yosuke Honda, Oleg Khainovski, Yury Kolomensky, Peter Loscutoff, Alexey Lyapin, Stephen Malton, Justin May, Douglas McCormick, Robert Meller, David Miller, Toyoko Orimoto, Marc Ross, Mark Slater, et al. | Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:728(2013)53-58 | 平成 25 年 11 月 | 国外 | △ |
| 電子加速用スポーク型超伝導空洞の開発計画 | 羽島良一, 沢村 勝, 岩下芳久 | 加速器 Vol. 10, No.4, pp.238-245 (2013) | 平成 25 年 12 月 | 国内 | ○ |
| Development of an intense positron source using a crystal-amorphous hybrid target for linear colliders | Y. Uesugi, T. Akagi, R. Chehab, O. Dadoun, K. Furukawa, T. Kamitani, S. Kawada, T. Omori, T. Takahashi, K. Umemori, J. Urakawa, M. Satoh, V. Strakhovenko, T. Suwada, A. Variola | Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B:319(2014)17-23 | 平成 26 年 1 月 | 国外 | △ |
| Experimental Validation of a Novel Compact Focusing Scheme for Future Energy-Frontier Linear Lepton Colliders | G.R. White et al. (ATF2 Collaboration) | Phys. Rev. Lett. 112, 034802 | 平成 26 年 1 月 | 国外 | △ |
| Linear and second order optics corrections for the KEK Accelerator Test Facility final focus beam line | T. Okugi, S. Araki, P. Bambade, K. Kubo, S. Kurado, M. Masuzawa, E. Marin, T. Naito, T. Tauchi, N. Terunuma, R. Tomas, J. Urakawa, G. White, and M. Woodley | Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 023501 | 平成 26 年 2 月 | 国外 | △ |

| 掲載した論文 (発表題目) | 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 | 本委託費による 成果か ○：ほぼ全て △：一部 |
|---|--|--|-------------|------------|----------------------------------|
| Ultrashort electron bunch generation by an energy chirping cell attached rf gun | K. Sakaue, Y. Koshiba, M. Mizugaki, M. Washio, T. Takatomi, J. Urakawa, and R. Kuroda | Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 023401 | 平成 26 年 2 月 | 国外 | ○ |
| Design and high order optimization of the Accelerator Test Facility lattices | E. Marin, R. Tomás, P. Bambade, K. Kubo, T. Okugi, T. Tauchi, N. Terunuma, J. Urakawa, A. Seryi, G.R. White, and M. Woodley | Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 021002 | 平成 26 年 2 月 | 国外 | △ |
| Experimental and theoretical progress of linear collider final focus design and ATF2 facility | Andrei Seryi, Rogelio Tomas, Frank Zimmermann, Kiyoshi Kubo, Shigeru Kuroda, Toshiyuki Okugi, Toshiaki Tauchi, Nobuhiro Terunuma, Junji Urakawa, Glen White, Mark Woodley, Deepa Angal-Kalinin | Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:740(2014) 2-5 | 平成 26 年 3 月 | 国外 | △ |
| Laserwire: A high resolution non-invasive beam profiling diagnostic | L. Corner, A. Aryshev, G.A. Blair, S.T. Boogert, P. Karataev, K. Kruchinin, L.J. Nevay, N. Terunuma, J. Urakawa, R. Walczak | Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:740(2014)226-228 | 平成 26 年 3 月 | 国外 | △ |
| Measurement of nanometer electron beam sizes with laser interference using Shintake Monitor | Jacqueline Yan, Yohei Yamaguchi, Yoshio Kamiya, Sachio Komamiya, Masahiro Oroku, Toshiyuki Okugi, Nobuhiro Terunuma, Kiyoshi Kubo, Toshiaki Tauchi, Junji Urakawa | Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:740(2014)131-137 | 平成 26 年 3 月 | 国外 | △ |

2.3.3 その他ニュース（受賞やプレス状況）、知的財産権（申請状況）等

特許の名称 「光共振器システム」（浦川順治、坂上和之）平成 25 年 9 月 12 日特許出願

特許番号 PCT/JP2013/075379

特許の名称 「リング型光共振器 2 複数台を使った X 線及びガンマ線左右円偏光および水平・垂直偏光高速切換え法」（浦川順治、本田洋介）平成 25 年 12 月 11 日特許出願

特許番号 US61/914737

2.4 活動（運営委員会等の活動等）

| 活動内容 | 日時 | 場所 |
|---------|-------------------------|-----------------------------------|
| 第2回全体会議 | 平成25年8月19日 14:00～17:00 | 東北大学 片平キャンパス、片平北門 会館2F |
| 第3回全体会議 | 平成25年10月15日 13:30～17:00 | 広島大学 学士会館 会議室1 |
| 第4回全体会議 | 平成25年12月10日 13:30～17:30 | 早稲田大学 西早稲田キャンパス、 62W号館1F 中会議室 |
| 第5回全体会議 | 平成26年2月20日 13:00～16:30 | 京都大学 化学研究所、イオン線型加 速器実験棟 2F 会議室 |

2.5 実施体制

別表1 平成25年度に於ける実施体制

| 業務項目 | 担当機関等 | 研究担当者 |
|---|---|---|
| ① X線生成性能向上のための技術開発および各要素技術の開発支援 (1) LUCXでの研究開発 (2) cERLでの研究開発 (3) クライオ高周波電子銃開発協力 (4) レーザー開発協力 (5) X線検出器およびX線イメージング法の研究開発 | 茨城県つくば市大穂1番地1、 高エネルギー加速器研究機構・ 加速器研究施設 | ◎○浦川順治、 荒木栄、照沼 信浩、本田洋 介、福田将史、 M.Shevelev、赤木 智哉、K.Lekomtsev 高富俊和、吉田光 弘、三好敏喜 |
| ②超伝導高周波加速空洞運転技術の確立 (1) STFでの超伝導空洞研究開発 (2) cERLでの超伝導空洞研究開発 | 茨城県つくば市大穂1番地1、 高エネルギー加速器研究機構・ 加速器研究施設 | ◎○浦川順治、 早野仁司、久保浄、 内藤孝、大森恒彦、 幅淳二 |
| ③光高周波電子銃用新マルチアルカリ光カソードおよ びレーザー蓄積装置のフィードバック技術開発 (1) 光高周波電子銃用新マルチアルカリ光カソード開発 (2) レーザー蓄積装置のフィードバック技術開発 | 広島県東広島市鏡山一丁目3番 1号、広島大学・大学院先端物 質科学研究科 | ○栗木雅夫、 高橋徹、清宮裕史、 許斐太郎 |
| ④スポーク型超伝導空洞の開発 (1) 325 MHz スポーク型超伝導空洞の開発 (2) 高量子効率カソードの開発 | 茨城県那珂郡東海村村松4番地 49号、日本原子力研究開発機構 | ○羽島良一、 沢村勝、永井良治、 西森信行 |
| ⑤小型高輝度X線源を用いたX線イメージング装置の 基盤技術開発 | 東京都昭島市松原町3-9-12、 株式会社 リガク | ○虎谷秀穂、 栗林勝、田口武慶 |
| ⑥クライオ光陰極高周波電子銃開発 | 東京都千代田区九段南四丁目8 番24号、日本大学 | ○田中俊成、 境武志、中尾圭佐、 野上杏子、稲垣学、 新富孝和 |
| ⑦大強度高繰り返しレーザー開発 | 東京都新宿区大久保3-4-1、 早稲田大学 理工学術院総合研究 所 | ○鷲尾方一、坂上 和之、保坂勇志 |
| ⑧小型加速器を用いた逆コンプトン散乱光源による最 適なイメージング手法の開発 | 茨城県つくば市梅園1-1-1、 産業技術総合研究所 | ○黒田隆之介、 平義隆 |
| ⑨スポーク型超伝導空洞開発に於ける設計及び非破壊 検査 | 京都府京都市左京区吉田本町 京都大学・化学研究所 | ○岩下芳久、 頓宮拓 |
| ⑩小型高輝度X線発生装置を用いたX線位相イメージ ング法の開発 | 宮城県仙台市青葉区片平二丁目 1-1、東北大学・多元物質科学 研究所 | ○百生敦、 M. Olbinado、 矢代航 |
| ⑪プロジェクトの総合的推進 | 茨城県つくば市大穂1番地1、 高エネルギー加速器研究機構・ 加速器研究施設 | ◎○浦川順治、 荒木栄 |

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。