

「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 26 年度委託業務成果報告書

平成 27 年 5 月

代表者 照沼 信浩
(高エネルギー加速器研究機構・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 26 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. 委託業務の目的	1
2. 平成 26 年度（報告年度）の実施内容	2
2.1 実施計画	2
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及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	19
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）	22
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）	31
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）	44
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）	48
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）	62
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）	69
⑨ スポーク型超伝導空洞開発にお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）	75
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）	81
⑪ プロジェクトの総合的推進	88
2.3 成果の外部への発表	91
2.3.1 学会等における口頭・ポスター発表	91
2.3.2 学会誌・雑誌等における論文掲載	98
2.3.3 その他ニュース（受賞やプレスの状況）、知的財産権（申請状況）等	100
2.4 活動（運営委員会等の活動等）	101
2.5 実施体制	102

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。ブレイ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 100 kW 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 26 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及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を行う。現状 10 keV から 20 keV X 線領域で毎秒 10^7 光子数生成程度であるが、平成 26 年度中に X 線発生光子数を 10^9 程度まで上げるために、光共振器の 4 枚ミラー支持テーブルの剛性を上げてレーザー蓄積増倍率を更に 10 倍上げを試みる。さらに、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ことを試みる。また、レーザー蓄積パワーが ICS 時 200 kW から 500 kW まで増強すると同時に、衝突点での両ビームを 30 mm (σ) 以下にすることを試みる。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実施する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試験へ、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 蓄積実験に着手し、蓄積安定度等のデータの取得を試みる。

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に着手し、増大率 5000 倍以上を目指す。また、 10^8 から 10^9 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着手し、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ことを試みる。また、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ための最適な X 線測定系の詳細設計を試みる。

② 超伝導高周波加速空洞運転技術の確立

KEK では超伝導加速器の運転性能を上げるために、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究する。平成 25 年度に大強度電子ビーム負荷無しで、パルス 30 MV/m 超伝導高周波加速空洞運転技術及び連続波 15 MV/m 超伝導高周波加速空洞運転技術の確認並びに、100 μ A で連続波 10 MV/m 超伝導高周波加速空洞運転を開始した。平成 26 年度は 1 mA で連続波 15 MV/m 超伝導高周波加速空洞運転を可能にできるように、超伝導空洞のフィードバック技術の向上により電子ビームの安定加速技術を確認する。

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 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試み、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、試作を開始する。また最適化の指標とするため、

マルチアルカリカソードの表面分析に取り組む。

また、KEK 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。平成 25 年度に引き続き、開発したレーザー蓄積装置に高反射率鏡を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を行う。特に、KEK において高反射率鏡を実装したレーザー蓄積共振器による光子生成実験に着手し、光子強度向上のためのデータの蓄積を試みる。平行して平成 25 年度より継続しているレーザー蓄積共振器の高精度制御装置試験を実施し、そのデータに基づいたデジタル制御装置の導入を行う。

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)

参画機関である国立大学法人京都大学と協力して 4K で高電界加速運転可能な 325 MHz 新超伝導空洞開発を進める。平成 26 年度は、マルチパクティング（共鳴電子増倍）の解析結果を反映した空洞形状の改良、必要な加工精度を得るための空洞製作工程の最適化を行う。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を試作し、量子効率等の評価に着手する。

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。具体的には、小型高輝度 X 線発生装置で用いる 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、現在開発中及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。また、市場調査、アプリケーションの探索に着手する。

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)

平成 25 年度の基本設計に基づき試作した 2.6 セルの C-バンド (5,712 MHz) 高周波 (RF) 空洞について、既存のクライオスタットに設置し 20 K における高周波特性の詳細な測定を引き続き行う。20 K での高周波特性に関して得られた成果を基に、平成 26 年度は次の段階として、RF 入力用カップラーと光陰極装着部の構造を備えた RF 空洞を設計・試作し、20 K において低電力試験を行う。さらに、この低電力試験の成果に基づき実機の設計に着手する。RF 空洞の設計では、3次元 RF 空洞計算コード CST STUDIO を用いる。RF 空洞の製作は KEK が担当する。平成 25 年度における成果によって、室温で無負荷 Q 値約 12,000 の高純度銅製 C-バンド RF 空洞は、低温時の異常表皮効果の寄与が大きいものの、20 K まで冷却した際には無負荷 Q 値が 60,000 以上、またシャントインピーダンスが 500 M Ω /m 以上になることが分かっている。この場合、空洞への入力ピーク RF 電力 600 kW 台で RF 電子銃として十分な加速電界が得られる。RF 電子銃を短パルスで動作させる際には、高い負荷 Q 値により空洞内 RF 電力の立ち上がり時間が長くなるのを避けるため、空洞と導波管との RF 結合を十分に大きくする必要がある。そ

ここで平成 26 年度は、カップラーの設計・製作においては RF 立ち上がり時間 0.3 μsec 以下、結合係数 $\beta = 10$ 以上のオーバーカップルとなるカップラーの実現を目指す。

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)

50 から 200 W 高繰り返しモードロックレーザー開発を目標にして、出力 1 W 程度を目指した前段増幅器の開発を実施する。そのために、増幅前のパルス幅伸長器及び増幅後の圧縮器の最適設計並びに増幅器の最適設計を検討する。前段増幅器の性能試験は KEK の光共振器を用いて行う。

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が所有する S バンド小型リニアック施設を用い、逆コンプトン散乱 X 線生成及びイメージング手法に関する研究開発を KEK と協力して推進する。平成 25 年度はレーザー装置の復旧で X 線生成への見通しがつき、衝突角 90 度でエネルギー 10 keV 程度の X 線生成を目指したが、平成 26 年度は、更に電子ビームとレーザーを整備し、衝突角 15 度においてエネルギー 20 keV 以上の逆コンプトン散乱 X 線を生成する。電子ビームの整備では、小型光陰極蒸着装置の開発を行う。参画機関である国立大学法人東北大学及び株式会社リガクと協力して X 線位相イメージング装置の設計・開発を行い、位相画像取得実験を行う。

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進める。平成 26 年度は、マルチパッキングが運転の障害とならないよう、改良後の空洞形状の解析に着手する。並行して、空洞製作において必要な加工精度を得るための工程設計について、独立行政法人日本原子力研究開発機構と議論を進めながら 3D-CAD での思考実験を繰り返し、最適化を試みる。また、スポーク空洞は複雑な構造を持ち、現状では非破壊検査の手法が確立されてないため、その手法について検討し、検査機器の設計を行う。

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)

X 線位相イメージングを実施するために、平成 25 年度に試作した Talbot 干渉計用の X 線透過格子を設置するための精密アライメントステージを、参画機関である独立行政法人産業技術総合研究所の S バンド小型リニアック施設に設置し、逆コンプトン散乱 X 線による位相イメージングの初期実験に着手する。この線源の空間的干渉性の制限のために、追加の X 線透過格子を加えた Talbot-Lau 干渉計構成にすべきであることを平成 25 年度の研究で明らかにしたが、その追加格子を試作する。画像検出器については、参画機関の株式会社リガクの協力も得て、撮

影実験を実施する。撮影した X 線画像の鮮明度などを評価し、X 線格子の品質、空間分解能、撮影時間、および X 線スペクトルの影響などの項目で、位相イメージングのパフォーマンスを検証する。これを受けて、さらに高感度な撮影を実現するために、X 線格子デザインの高度化検討（アスペクト比の向上、周期の縮小など）を行う。

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及び各要素技術の開発支援

概 要

小型常伝導電子線形加速器（以下、「LUCX」という。）におけるレーザー逆コンプトン散乱（以下、「LCS」という。）によるX線生成性能を上げるために、電子ビームパルス幅を拡げ1000 bunches/pulseの加速運転を実現するとともに、レーザー蓄積光共振器の高度化を進め蓄積パワーを214 kWから250 kWに改善した。この電子ビームと蓄積レーザーを衝突させ、1000バンチのLCS-X線生成を確認した。ポッケルスセル素子による入射レーザー高度化試験にて更に10倍以上のレーザー増幅が得られることを確認し、レーザー蓄積装置の目標である1 MWを越える高強度化への知見を得ることができた。

エネルギー回収型線形加速器（以下、「cERL」という。）においては、平成27年3月よりLCS-X線生成試験を開始するなど平成27年度に行うX線イメージングに向けて着実な進展があった。

X線検出器開発ではSOI検出器の高速化を進め、最大70 Hzの読み出しを実現した。

学校法人日本大学と共に実施するクライオ高周波電子銃開発において、平成25年度に製作した試験空洞の冷温性能試験を行い、その結果を反映した高周波入力カップラー付低電力用試験空洞を製作した。

学校法人早稲田大学が実施するファイバーレーザー増幅技術に基づく50 Wレベルの357 MHzモードロックレーザー発生装置をLUCXに構築し試験すると共にレーザー蓄積共振器の高度化を進め、前述の250 kWのレーザー蓄積を得た。

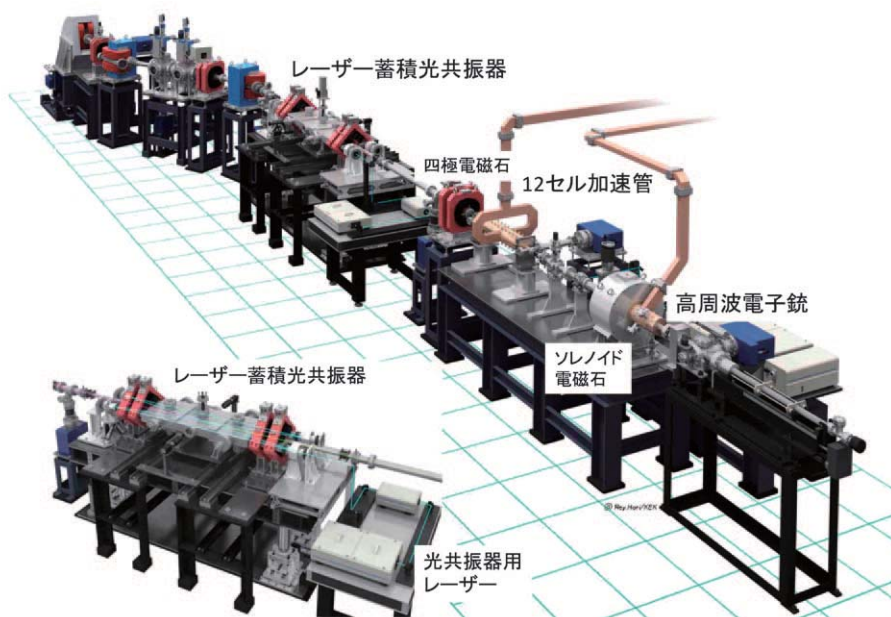
国立大学法人広島大学と共にレーザーパルス蓄積共振器の性能を上げる鍵となる高反射率ミラーの取り扱い方法を評価し、得られた手法をLUCXおよびcERLでの研究開発に適用した。

①-1 LUCXでの研究開発

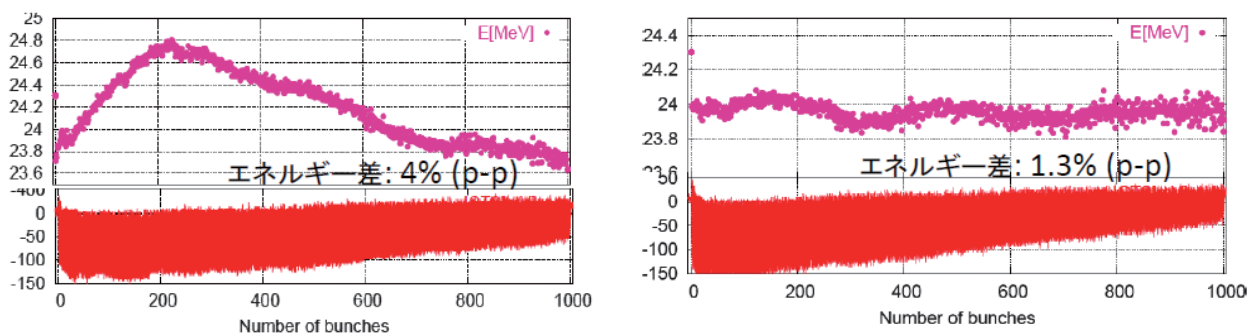
①-1.1 マルチバンチ電子ビーム技術開発

LUCXの概要を①-図1に示す。平成26年度は、X線発生光子数を上げるために1000 bunches/pulseのマルチバンチ電子ビームを安定に実現する技術開発を行った。平成25年度にパルスあたりの電荷量450 nCで1000 bunches/pulseの電子ビーム運転を実現したが、12セル加速管への入力高周波パワー不足によりビーム負荷補正が十分ではなく、バンチ毎のエネルギーは①-図2(a)に示すように全体で4% (peak-peak) と大きくドリフトしていた。レーザーとの衝突実験に求められるマルチバンチエネルギー拡がり目標0.1% (標準偏差値) である。LUCXにおける今までのビーム負荷補正は、加速管に高周波パルスが入力され加速電界が上昇していく過渡期に電子ビームを通過させ、後方バンチほど加速電界を高くしてビーム負荷分を相殺する方法 (Δt 法) であった。しかし、バンチ数が多くなり1000 bunches/pulseになると時間長で2.8 μ s となり、加速管における高周波の充填時間 (0.8 μ s) より十分長く、後方バンチでは高周波が満たされた状態となり過渡期を利用する Δt 法ではビーム負荷を相殺できない。そのため平成26年度は、高周波振幅変調器を新たに導入し、加速管へ入射する高周波の振幅を1000

バンチに渡り調整することで、マルチバンチ電子ビームのエネルギーを揃える技術の開発を行った。①-図3は、振幅変調時におけるクライストロンに対するRF AMP出力信号である。この結果、1000バンチに渡るビーム負荷補正がより細かく実現され、パルスあたりの電荷量 600 nC で 1000 bunches/pulse、マルチバンチエネルギー拡がり 1.3% (peak-peak)、0.2% (標準偏差値) のマルチバンチ電子ビームの実現に成功した (①-図2 (b))。



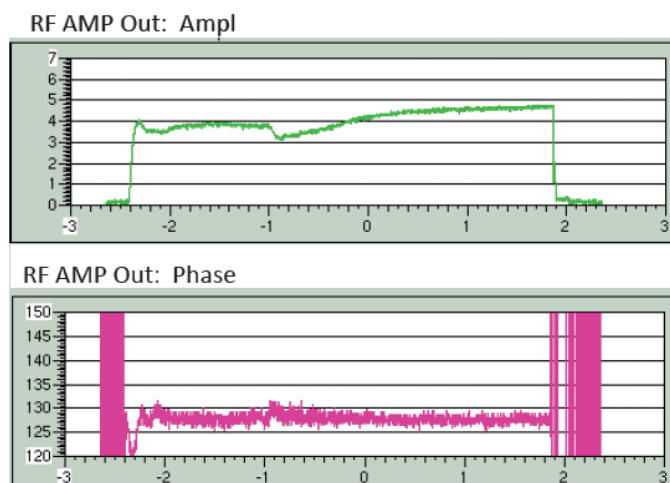
①-図 1. LUCX 加速器の構成



①-図 2. (a) Δt 法による補正。

(b) Δt 法と振幅変調による補正

上段はバンチ毎のエネルギー (MeV)、下段はバンチ毎の電荷量 (相対値)。

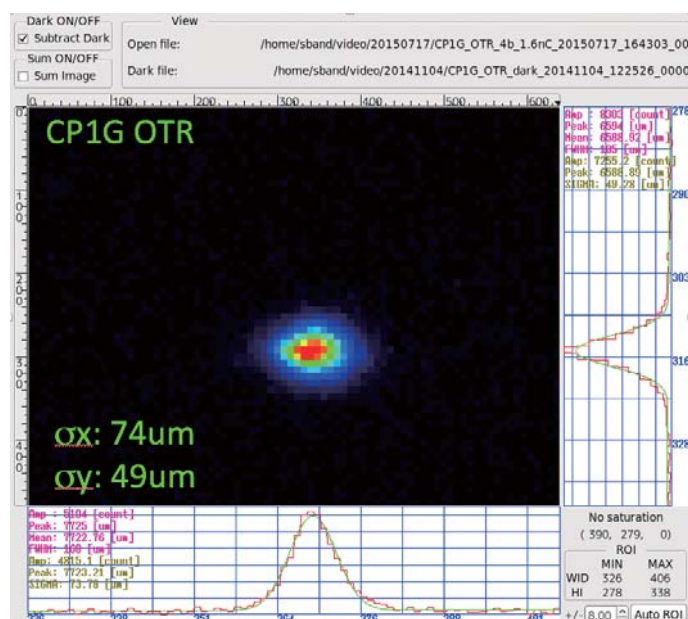


①-図 3. 振幅変調時における RF AMP 出力信号。振幅（上）と位相（下）。

一方、バンチ電荷については後方バンチほど減少している事が確認された。これは光陰極型高周波電子銃での電子ビーム生成に用いるレーザーパルス列の強度が、後方バンチほど低くなっているためであり、レーザーパルス増幅器において前方バンチに励起エネルギーを取られ、後方バンチでは光増幅が下がっているためと推測される。

レーザーとの衝突点における電子ビームサイズの調整は、1000 バンチビーム開発の進捗に合わせて実施した。電子銃ソレノイド電磁石と 12 セル加速管下流の四極電磁石を調整し、平成 25 年度に垂直方向 60 μm であったものを平成 26 年度は 49 μm まで改善した（①-図 4）。

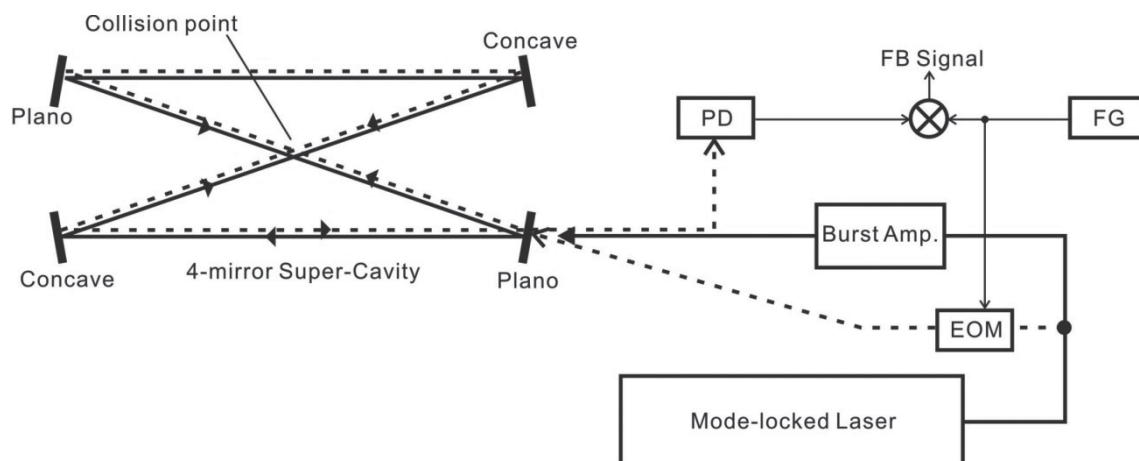
平成 27 年度は電子銃レーザー系の改善と高周波振幅変調の最適化を進め、一様かつ安定な 1000 バンチ電子ビームと共に 30 μm のビームサイズの実現を目指す。



①-図 4. LUCX における LCS 発生点における電子ビームサイズの測定

①-1.2 レーザー蓄積技術開発

LUCX は常伝導の線形加速器でありパルス的に電子ビームを生成する。従って、この電子ビームと衝突するタイミングにレーザーを集約することにより効率的な X 線生成が実現される。平成 25 年度までに逆周回による光共振器フィードバック技術を開発し、安定に高強度のレーザーパルスが光共振器内に蓄積することに成功している（①-図 5）。

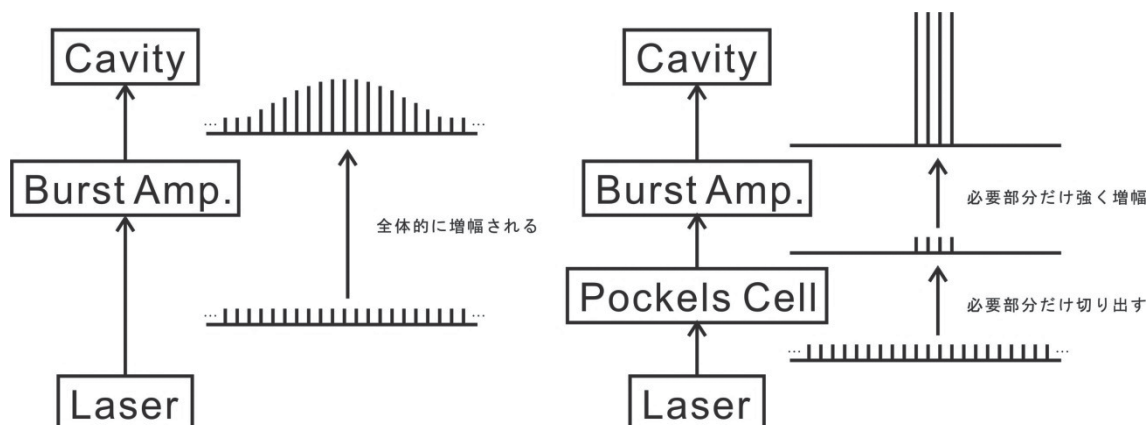


①-図 5. 逆周回フィードバック概念図。レーザー発振器から得られるレーザー光を二つに分け、メインパルス（実線）はバースト増幅を通して瞬間的に強い光を生成する。このバーストされた光では光共振器のフィードバック制御が通常うまく行えない。そこで、二つに分けたもう一方を増幅せずにフィードバック用の逆周回パルス（点線）として用いる。逆向きの周回では容易にメインパルスと切り分けることが可能であり、安定なフィードバックが実現する。

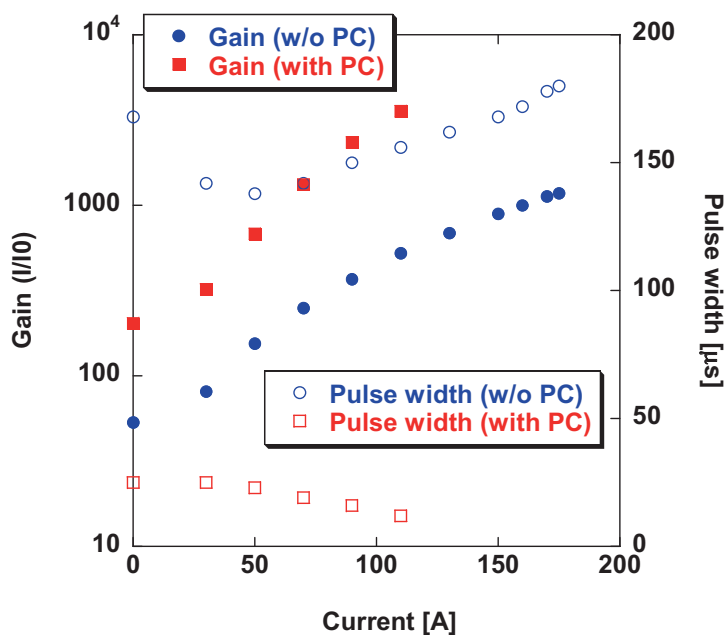
平成 26 年度は、入射するレーザー光をパルス的に増幅することにより瞬間的に非常に強いパワーを光共振器内に蓄積する技術開発を進めた。そのために、まず光共振器システムの安定化を追求した。光共振器の 4 枚ミラー駆動機構は一体のコンクリート製テーブルに設置されている。光共振器への入射レーザー系は、このテーブルの一端を拡張して載せていたが、ここでの剛性を高めるために新たにブレッドボードを調達し、入射光学系を再構成した。同時に 4 枚ミラー駆動装置を囲むように遮光防音壁を設置し、外部環境による振動に対する低減策を施した。また、今後の研究開発を進める上で、使用しているレーザー発振器の老朽化が問題であると判断し、KEK が別途所有していた同種のレーザー発振器に交換した。これらの対策後に、バースト増幅器とレーザー蓄積共振器の調整を進めた結果、平成 25 年度に得られた蓄積レーザーパワー 214 kW に対して 250 kW まで改善した。

一方、光共振器への入射レーザー強度を更に高める技術開発も進めた（①-図 6）。バースト増幅器の上流にポッケルスセルを配置して電子ビームとの衝突に必要なタイミングのシード光のみを通過させる。これにより、電子ビームとの衝突に関与しない不要なシード光によるバースト増幅器での励起パワーの浪費を抑える。結果、電子ビームとの衝突タイミングでのバースト増幅効率が大きく改善し、高強度レーザーが実現される。この技術検証試験を入射レーザー部単独で行った。ポッケルスセルを導入したバースト増幅により、瞬間的に生成されるレーザー強度を従来の 10 倍程度増大できることを確認することができた（①-図 7）。引き続きこの高

強度レーザーを光共振器に導入して蓄積試験を行った。しかしながら、入射直後に光共振器を構成する高反射率鏡の一部が破損したため試験を中断した。破損の原因は高反射率鏡の誘電多層膜の耐性不足、意図しないレーザーの絞り込み、または鏡表面のゴミや汚染などが考えられる。再現試験と原因の追及を平成 27 年度に行う。この鏡の問題を解決する必要はあるが、ポッケルスセルによる入射レーザー高強度化は重要な進展であり、目標である蓄積レーザーパワー 1 MW を越える高強度化への見通しを得たと言える。



①-図6. ポッケルスセルを導入したバースト増幅セットアップ (左：導入前、右：導入後)。レーザーの増幅結晶 Nd:YAG はレーザーダイオードの励起パワーをある程度の時間蓄積することが可能である。そこでポッケルスセルによって必要な時間幅だけシード光を切り出すことによって時間的に光パワーを集め、増大させることが可能である。



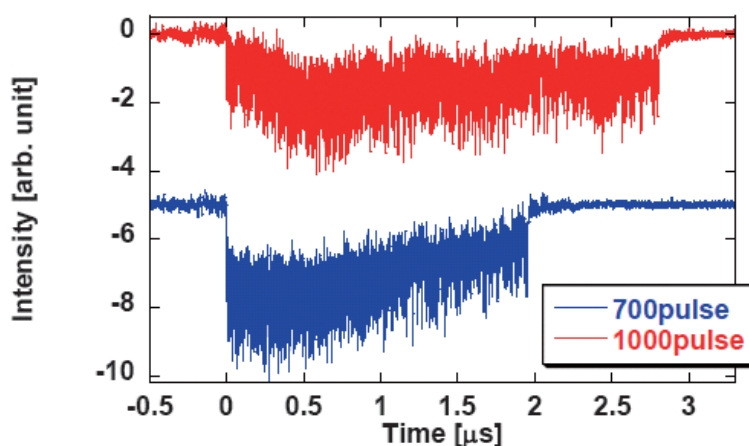
①-図7. 入射レーザーにおけるポッケルスセル増幅試験結果。横軸はバースト増幅器電流。ポッケルスセル (PC) ありの場合では 1 桁高い増幅が得られ、パルス幅も 1 桁小さく短時間に光パワーを集められたことが確認できる。

①-1.3 LCS-X 線生成技術開発

平成 26 年度の LUCX における LCS-X 線生成実験は、パルスあたりの電荷量 600 nC の 1000 bunches/pulse 電子ビームと蓄積パワー 250 kW のレーザーを用いて実施した。主なパラメータを①-表 1 に示す。パルスあたりのバンチ数を 700 バンチ (2.0 μs) と 1000 バンチ (2.8 μs) に設定し、Micro Channel Plate (MCP) 検出器で得られた信号を①-図 8 に示す。

①-表 1. LUCX における LCS 実験時の電子ビームと蓄積レーザー

	Electron beam	Laser (In cavity)
Energy	24 MeV	$\lambda=1064 \text{ nm}$ (1.17 eV)
Intensity	0.6 nC/bunch	0.7 mJ/pulse (250 kW)
Beam size	$\sigma_x, \sigma_y = 80 \mu\text{m}, 60 \mu\text{m}$	$\sigma_x, \sigma_y = 89 \mu\text{m}, 85 \mu\text{m}$
Pulse width	15 ps (FWHM)	7 ps (FWHM)
Number of bunch	700 or 1000 bunches/train	

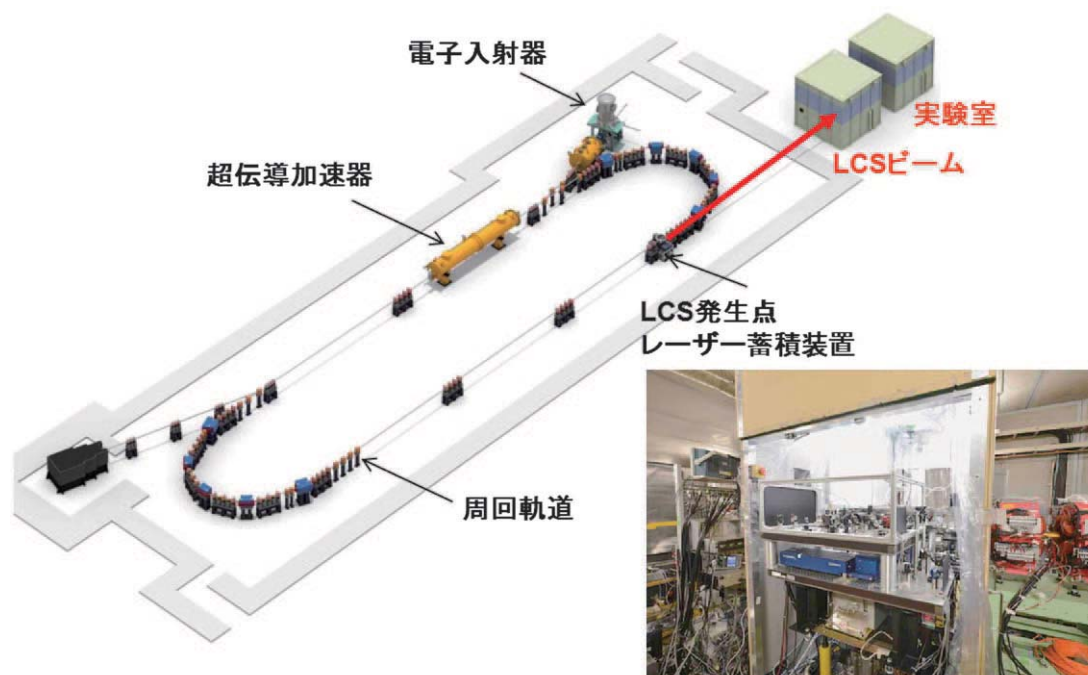


①-図 8. LUCX で測定した LCS-X 線信号

1000 バンチの電子ビームの場合、2.8 μs に渡って X 線の信号検出に成功しており、1000 バンチ全体に渡りレーザーとの衝突を実現したことが確認できる。しかしながら、バンチ毎の X 線強度では、バンチ毎の電荷量 (①-図 2 (b)) から期待される X 線強度分布にはなっていない。また、先頭部分では 700 バンチの場合と比べて匹敵する X 線強度が得られていない。一方、700 バンチの結果では、バンチ毎の電子ビーム強度 (①-図 2 (a)) に応じた X 線生成分布を示している。これは、それぞれの場合においてマルチバンチ電子ビームの強度が最大となるように加速器が調整されていること、さらに全体の X 線信号量が最大になるように電子ビームとレーザーの衝突が調整されているためである。また、電子ビームと蓄積レーザーの衝突におけるバンチ毎のわずかな位置ずれや電子ビームサイズの違いから生じたものであると推測される。平成 27 年度はこれらの調査改善を進め、安定な X 線生成に向けた研究開発を継続する。

平成 26 年 11 月に高強度入射レーザーの蓄積試験で発生したレーザー蓄積共振器のミラー破壊からの復旧のためにメーカーの異なる同性能の新しいミラーで共振器を再構成した。しかしながら、再構成後の状態は、床振動、音や電気ノイズなど外部環境に対してレーザー蓄積状態が大きく影響されるようになっており、X 線生成試験を再開する前に原因の把握と改善を優先すべきと判断した。そのため、平成 26 年度での X 線生成再開と X 線イメージング試験は時間を確保できなかった。しかしながら、平成 26 年度に実現した 1000 バンチ電子ビームでの X 線生成および入射レーザー高強度化試験では多くの知見を得ることができている。平成 27 年度はレーザー蓄積共振器における入射レーザーの高強度化とレーザー蓄積増倍率の改善と共に 1000 バンチ電子ビームの安定化を進め、X 線発生光子数を 10^9 程度まで上げることを目指し、X 線イメージング技術開発を行う。

①-2 小型エネルギー回収型線形加速器（cERL）での研究開発



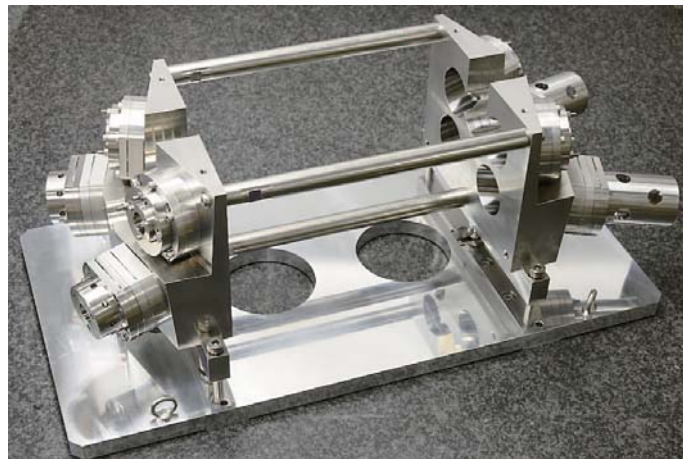
①-図 9. cERL LCS 装置配置図

cERL は平成 25 年度から運転を開始して $10\mu\text{A}$ - $8\text{MV}/\text{m}$ の電子ビーム加速によるエネルギー回収技術を実証した。平成 26 年度はビーム電流の上限を $10\mu\text{A}$ から $100\mu\text{A}$ に上げる申請を行うと共に LCS-X 線研究開発のためのレーザー蓄積共振器システム（本課題予算による製作）、X 線ビームラインおよび X 線実験室（文部科学省から JAEA に委託された核セキュリティ補助金による）を整備した（①-図 9）。cERL 用レーザー蓄積共振器（①-図 10）は、独立な 2 組の垂直平面 4 枚鏡共振器を合体させた 8 鏡光共振器として製作し、平成 26 年 12 月に cERL ビームラインに設置した。この光共振器は、同時に動作することで X 線強度を 2 倍にする、異なる偏光状態を設定して電子バンチの繰返し速度で偏光 X 線切り替えを行うなどの技術開発を行うことができる。

平成 27 年 1 月より cERL の試験ビーム調整が始まり、2 月 12 日にビーム電流 30 μA の下で放射線施設完成検査に合格、ビーム利用研究が開始された。基礎的なビーム特性を確認した後に LCS-X 線生成試験を開始し、平成 27 年 3 月 2 日には cERL として初めての LCS-X 線を検出することに成功した。X 線検出には発生点から 16.6 m の位置に置かれた直径 4.66 mm のシリコンドリフト検出器 (SDD) を使用した。その後、X 線生成数を上げるために、レーザー蓄積共振器、入射レーザー、電子ビームの調整を進めた。電子ビームについては最終的に 80 μA -8MV/m の加速に到達している。

平成 26 年度末までの cERL における LCS-X 線開発の成果として、SDD 検出器で 1200 photons/sec の X 線検出に成功した。これは発生点での X 線強度に換算すると 4.3×10^7 photons/sec に相当する。この時の電子ビームおよび蓄積レーザーのパラメータを①-表 2 に、測定した X 線のエネルギースペクトルを①-図 11 に示す。LCS-X 線の特徴である準単色性がよく確認でき、ピークエネルギーは 6.9 keV である。また、X 線ピークに対してバックグラウンドが十分に低い事が判り、平成 27 年度 4 月第一週に予定している X 線イメージング試験に期待が持てる結果を得た。

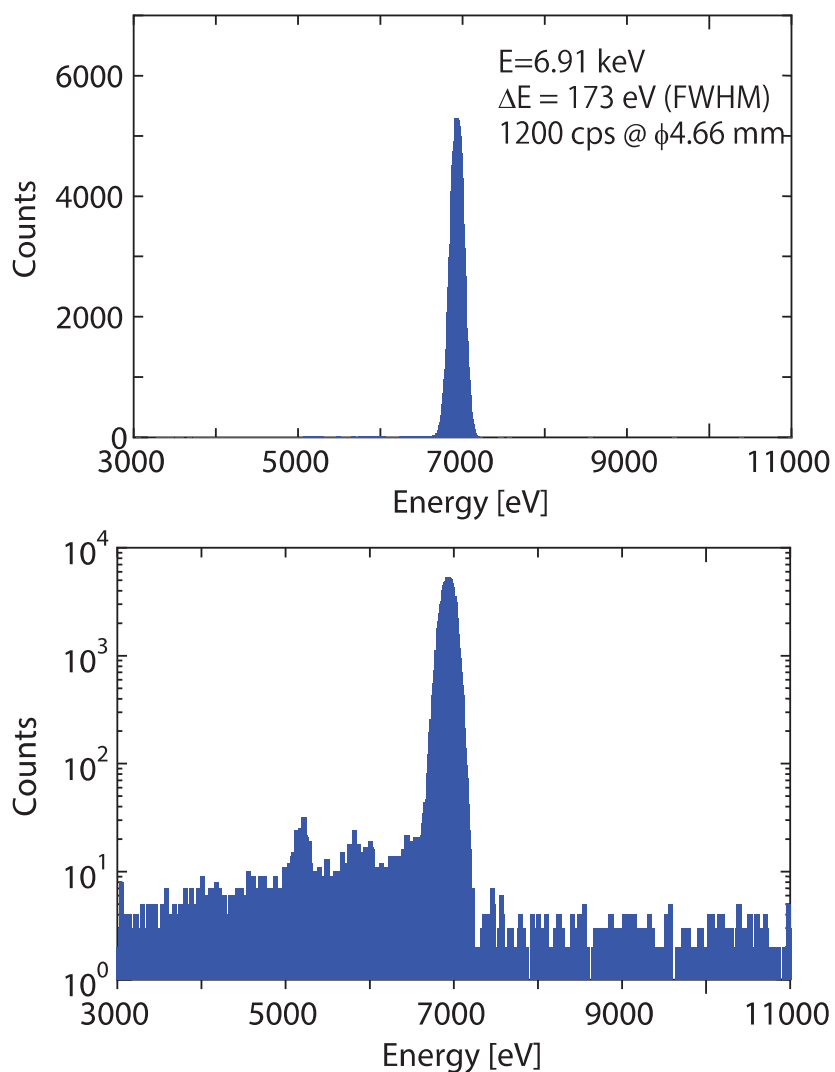
平成 27 年度は、ビーム電流の許可最大値を現在の 100 μA から 1 mA に上げることが計画されており、レーザー蓄積の改善を進めながら、より高い X 線フラックスでの X 線イメージング技術開発を行う予定である。



①-図 10. cERL 用レーザー蓄積共振器 (8 鏡光共振器)

①-表 2. cERL での LCS 実験時の蓄積レーザーと電子ビーム

蓄積レーザー		電子ビーム	
波長	1064 nm	エネルギー	20 MeV
平均パワー	10.4 kW	平均ビーム電流	58 μ A
パルス長	5.65 ps [rms]	バンチ長	2 ps [rms]
スポット径 (水平 / 垂直)	30 μ m / 30 μ m [rms]	スポット径 (水平 / 垂直)	130 μ m / 30 μ m [rms]
衝突角	18 $^{\circ}$	エミッタンス	0.4 mm \cdot mrad
レーザー繰り返し	162.5 MHz	バンチ繰り返し	162.5 MHz



①-図 11. cERL における LCS-X 線エネルギースペクトラム

①-3 クライオ高周波電子銃開発

平成 25 年度に学校法人日本大学と共に製作したクライオ高周波光電子銃のプロトタイプの 20 K 低温試験を実施した。その結果を基に、高周波カプラー付きのクライオ高周波光電子銃のプロトタイプを設計・製作した。詳細は学校法人日本大学の報告 (⑥) に記載する。

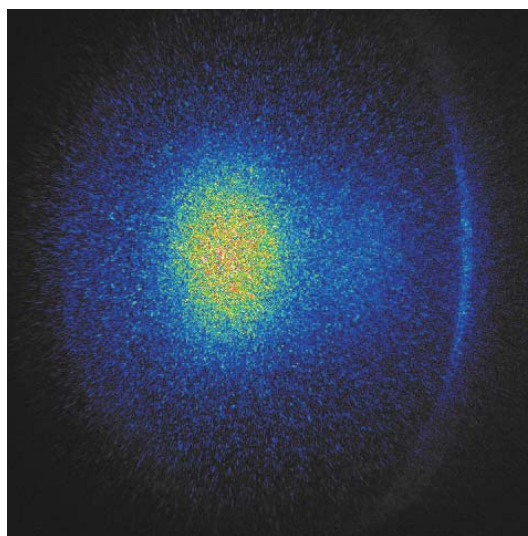
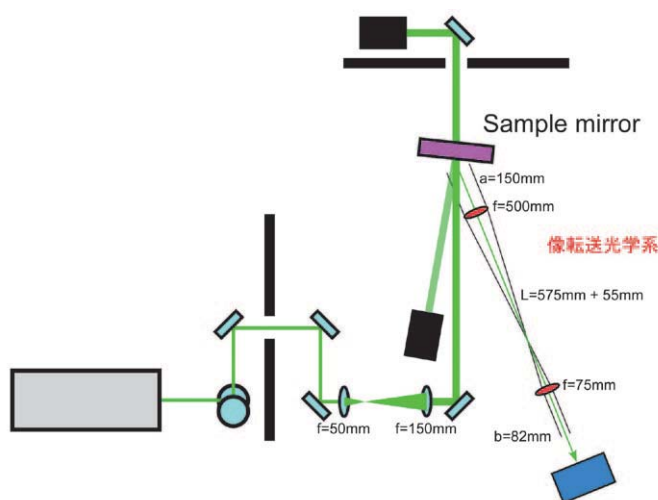
①-4 モードロックレーザー発生装置技術開発

Yb 光ファイバー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を学校法人早稲田大学と共に実施した。詳細は学校法人早稲田大学の報告 (⑦) に記載する。また、LUCX における 300 kW レーザー蓄積を目指した 50 W レベルの 357 MHz モードロックレーザー発生装置試験を、レーザー発振器、光共振器、クリーンルームを用いて学校法人早稲田大学と共に実施した。詳細は①-1.2 に記載する。

①-5 レーザー蓄積共振器の高度化

高い蓄積効率を持つレーザー蓄積共振器を目指し、高反射率ミラーの適切な取り扱い方法を追求した。ミラー表面が汚れていると、反射率の低下やミラーダメージの原因になる。そのため、清浄なミラー表面を確認するためのミラー散乱測定システムを構築した。試験体である高反射率ミラーに 532 nm のレーザー光を照射し散乱像をカメラで測定、その信号強度からミラー表面の状態を評価する (①-図 12)。

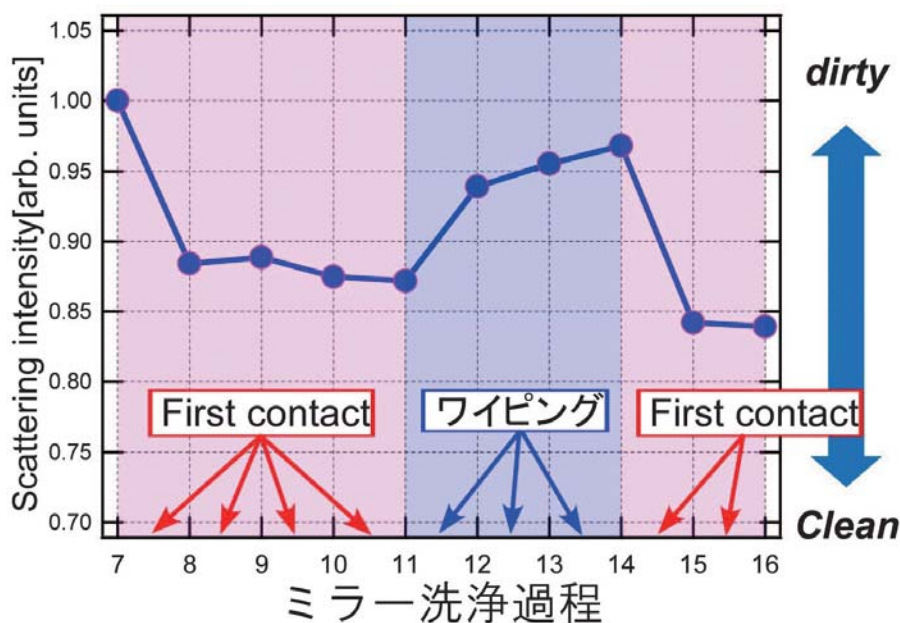
今回比較したミラー洗浄方法は、2-プロパノール原液をミラーの上に置いたレンズペーパーに数滴垂らし圧力をかけずにゆっくり引っ張るワイピング法と、塗膜剥離タイプのクリーナーで有機残留物や微粒子を除去することができる First Contact (Photonics Cleaning Technologies 社製) である。ワイピング法は国立大学法人広島大学においても評価を進めており、多様な条件での相補的な知見が得られるものと期待している。



①-図 12. (a) ミラー表面評価装置の構成

(b) ミラー洗浄における散乱像の例

①-図 13 にミラー洗浄による散乱強度の変化を示す。KEK で試験した条件では First Contact による洗浄がワイピング法よりも良い結果を与えた。また、First Contact で繰り返し洗浄しても特に悪化させることは無かった。この結果を基に、LUCX および eERL の LCS 実験で用いる全てのミラーについて、First Contact による清浄化を採用し、レーザー蓄積共振器に組み込んでいる。今までは目視でミラーの清浄状態を確認していたが、ミラー散乱測定システムにより定量的に評価できるようになった。レーザー蓄積共振器の再現性を高める上で重要な知見である。

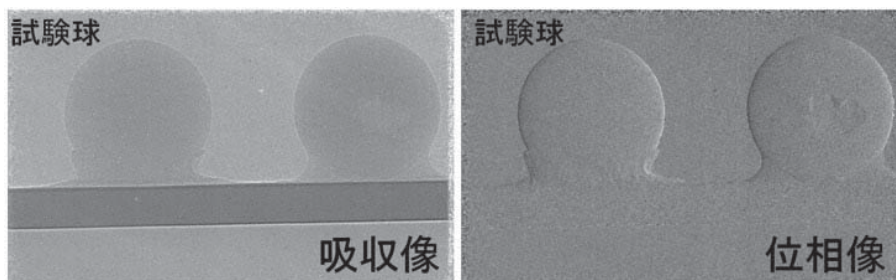


①-図 13. ミラー洗浄過程による散乱強度の変化

①-5 X線検出器およびイメージング法の研究開発

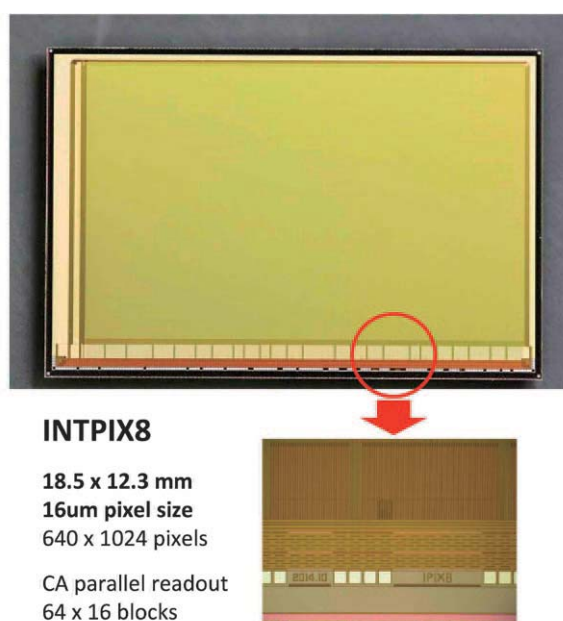
平成 26 年度は、次世代 X 線検出器として有望な SOI 検出器の性能向上および検出システムの改良に努めた。平成 25 年度までに製作した積分型 SOI ピクセルセンサー INTPIX4 とデータ収集基板 SEABAS2 の組み合わせでは 60~70 Hz の画像読み出しが期待できる。しかし、これまでの試験では 10~20 Hz 程度に留まり、数 Hz 運転であっても 100% のデータ収集効率が得られていなかった。ソフトウェア構成として CERN ROOT だけでなく、フリーソフトウェアの Qt および OpenCV を導入して、シングルスレッド駆動からマルチスレッド駆動にソフトウェアを改良した。その結果、システムとしてほぼ限界に近い 50~60 Hz でのデータ収集を実現した。

最新の、高抵抗ウエハを用いた INTPIX4 および DAQ 基板と、上述の新型ソフトウェアを用いて、いくつかの応用試行実験に取り組んだ。国立大学法人東北大学の百生グループと合同で位相イメージング試行実験を行った。高抵抗ウエハを用いるとリーク電流を低減できるので、数十ミリ秒の比較的長時間露光が可能になり、データ収集効率が上がる。その結果、実用的な時間で位相イメージング像データ収集により綺麗な屈折像が得られ、本 SOI 検出器の位相イメージング応用への有用性を示すことができた (①-図 14)。



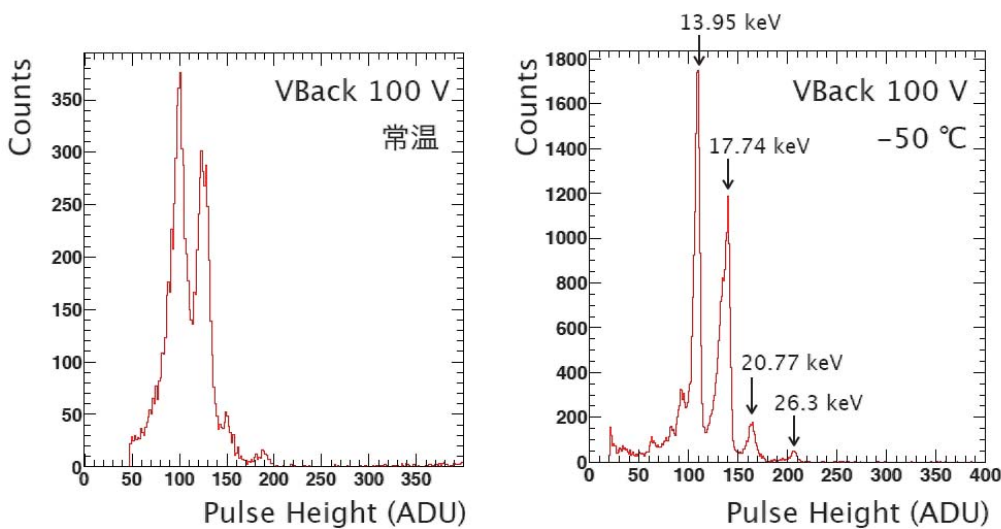
①-図 14. INTPIX4 による位相イメージング試行実験で得られた X 線吸収像と位相像

SOI 検出器実用化のためには、ウエハの質向上、放射線耐性の向上およびセンサ・回路間のクロストーク低減が必要不可欠である。そのために、通常の低抵抗のシングル SOI ウエハに加えて、高抵抗のシングル SOI および 2 重 SOI ウエハを用いた試作を行った。2 重 SOI ウエハ上に形成した各種トランジスタを用いた試験は過去になされており、X 線やガンマ線照射試験の結果、放射線耐性が一桁以上あがることはすでに確認されている。従来の積分型ピクセルセンサー INTPIX4 シリーズを更新し、2 重 SOI ウエハに対応した INTPIX7 を製作した。このセンサーはチップ面積が 1.8 mm 角と、これまで KEK で製作したチップとしては最大であり、低抵抗・高抵抗ウエハおよび 2 重 SOI ウエハに対応している。また、相乗りプロセスによる試作を平成 26 年 10 月に行い、ピクセル初段にアンプを搭載し、低エネルギー X 線測定にも対応した積分型ピクセルセンサー INTPIX8 を製作した (①-図 15)。今後はこれらセンサーチップを用いて実機としての放射線耐性試験、クロストーク低減効果について評価を行っていく。なお、INTPIX7, INTPIX8 センサーチップは新学術領域研究予算で製作され基礎研究が行われている。本課題では LCS-X 線を利用した先端 X 線イメージングでの応用・実用化のために評価試験を実施している。



①-図 15. SOI イメージセンサー INTPIX8

LUCX および cERL での LCS-X 線イメージングにおいて SOI 検出器を試験するための準備を進めた。LUCX での LCS-X 線生成はパルス的である。信号の積分時間は数十マイクロ秒で済み、低抵抗ウエハでも測定上問題はない。一方、cERL の LCS-X 線生成は連続的なため長時間露光が必要となり、またエネルギーは 7 keV と低いことから、低温下でのノイズを低減した測定が有効であると考えられる。①-図 16 は -50℃に冷却した SOI 検出器の試験結果であり、分解能の改善が見て取れる。平成 27 年度は、冷却システムの導入および前述の INTPIX8 センサーを用いて試験を行う予定である。



①-図 16. SOI 検出器の低温試験。Am-241 X 線スペクトルを測定。

② 超伝導高周波加速空洞運転技術の確立

概 要

超伝導加速器の運転性能を上げるために、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究すると共に、平成 26 年度は、cERL において 1 mA で連続波 15 MV/m の超伝導高周波加速空洞運転を可能にできるように電子ビームの安定加速技術の確認を進めた。平成 25 年度の 10 倍にあたる最大ビーム電流 100 μ A での運転を行うための整備を進め、電子ビーム運転において 60 μ A-8MV/m でのエネルギー回収技術を実証した。この電子ビームにより LCS-X 線生成に成功し、平成 27 年度に予定している LCS-X 線イメージング技術開発を実施する十分な見通しを得た。

②-1 パルス波の超伝導高周波加速空洞技術開発

STF において、パルス波の超伝導高周波による電子ビーム加速試験の準備が進められている。このための装置製造や性能試験は KEK の運営費交付金により実施されているものであるが、その成果は本委託業務課題に深く関係するため簡単に触れるものとする。

加速モジュールに装着するための超伝導加速空洞の製作において、1 バッチで 4 台の空洞を電子ビーム溶接する製造方法を採用し、1 回の表面処理（電解研磨）のみで平均 28 MV/m の加速電界性能を得た。一方で、KEK 所有のプレス機と電子ビーム溶接機を使用した KEK 自作の空洞製造を行い、加速電界 36 MV/m という高性能を実現するなど、空洞製作技術が確実に進歩している。

パルス超伝導高周波による電子ビーム加速試験装置として、12 m 長加速モジュールと 6 m 長ハーフサイズ加速モジュールが STF トンネル内に連結して設置された（②-図 1）。これらの加速モジュールには 12 台の超伝導加速空洞の他、米国フェルミ国立研究所製の伝導冷却型超伝導 4 極電磁石、ビーム位置モニターが組み込まれている。平成 26 年 10 月から冷却試験を実施し、各部の到達温度、空洞の共振周波数や負荷 Q 値、周波数調整装置の稼働、入力カップラーのカップリング稼働範囲を確認すると共に、超伝導 4 極電磁石や空洞型ビーム位置モニターなどビー

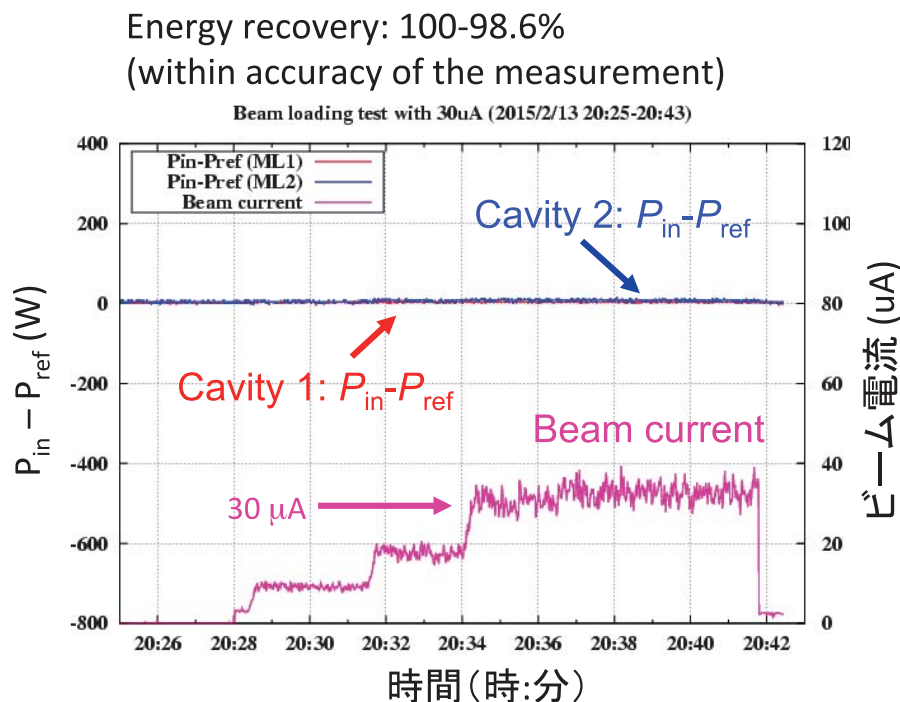


②-図 1. STF トンネル内の 12 m 長加速モジュールと 6 m 長ハーフサイズ加速モジュール

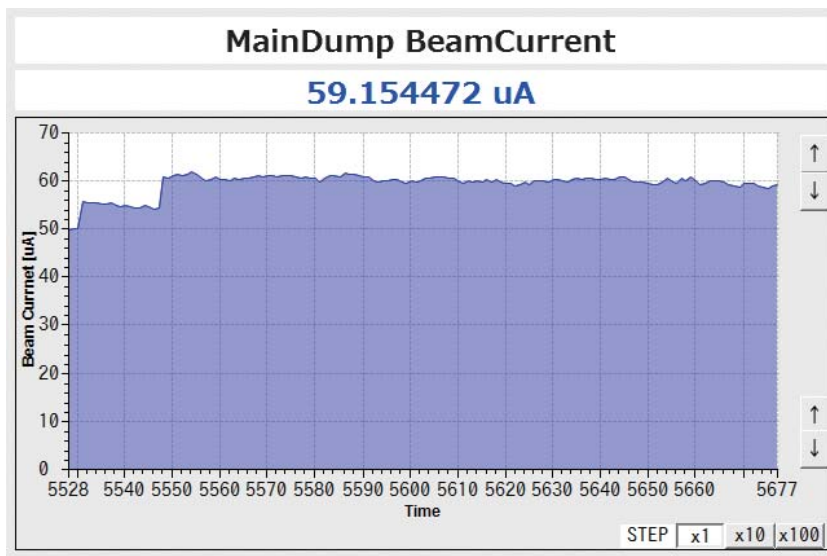
ム調整診断装置の低温下での健全性、さらに超伝導空洞のアライメント維持など、電子加速器システムを構成する要素技術に問題の無いことを確認した。平成 27 年度は高周波制御系の整備が進められ、平成 28 年度のビーム試験を予定している。

②-2 連続波の超伝導高周波加速空洞技術開発

cERL では平成 25 年度に $10\mu\text{A}$ - 8MV/m の電子ビーム加速によるエネルギー回収に成功している。平成 26 年度はビーム電流の許可最大値を $10\mu\text{A}$ から $100\mu\text{A}$ に上げると共に、LCS-X 線生成システムをビームラインに組み上げた。平成 27 年 1 月より電子ビーム運転を再開し、翌 2 月にビーム電流 $30\mu\text{A}$ の下で放射線施設完成検査に合格、ビーム利用開発研究が再開された。②-図 2 は 2 組の 9 連超伝導加速空洞による $30\mu\text{A}$ - 8MV/m の電子ビーム加速におけるエネルギー回収実証試験の結果である。エネルギー回収リニアックでは、空洞を 1 回目に通過する加速ビームに供給する電力は、2 回目に通過する減速ビームから回収する電力で賄われるため、合計したビーム加速電力 ($P_{in}\text{-Pref}$) はほぼゼロになる。実証試験では、ほぼ 100% のエネルギー回収を確認することができた。これら基礎的なビーム特性を確認した後に LCS-X 線生成試験を開始し、平成 27 年 3 月 2 日には cERL として初めての LCS-X 線を検出することに成功した(詳細は①-2 に記述)。その後、 $60\mu\text{A}$ - 8MV/m の連続電子ビーム加速 (②-図 3) に成功している。これらの電子ビーム加速技術の確認は、今後の 1mA で連続波 15MV/m の超伝導高周波加速空洞運転を目指すための重要なマイルストーンとなる。平成 27 年度はビーム電流の許可最大値を 10 倍の 1mA に増加させる予定である。



②-図 2. エネルギー回収運転でのビーム負荷電力の測定



②-図 3. 60 μ A-8MV/m の連続電子ビーム運転

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

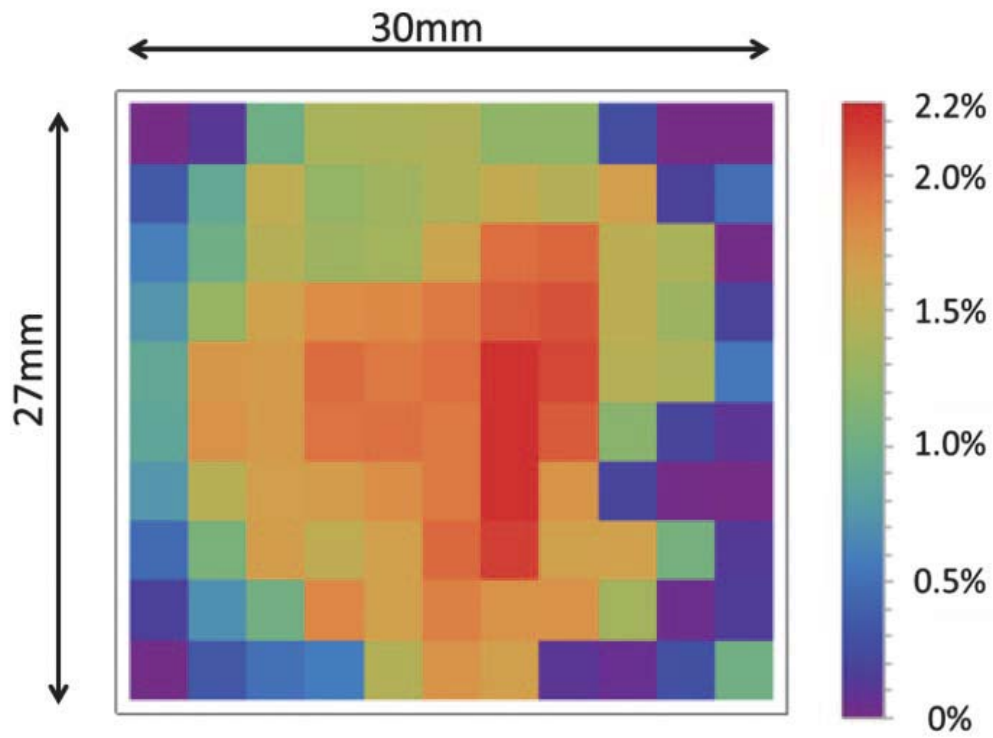
(再委託先：国立大学法人広島大学)

概 要

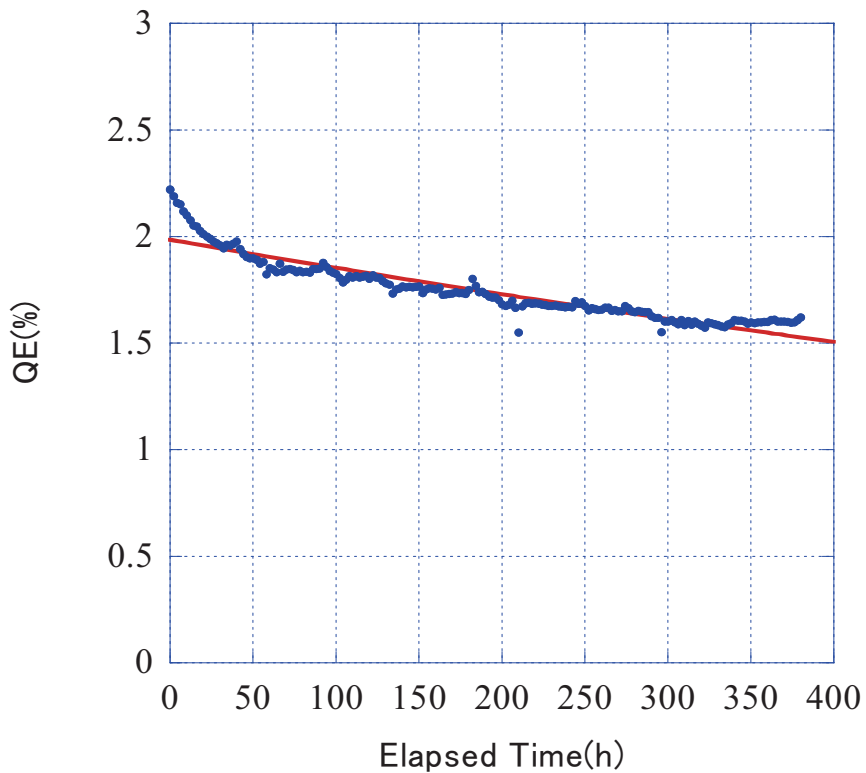
マルチアルカリの高量子効率カソードについて、蒸着条件の系統的研究から、最大で2.2%の量子効率、数十日という1/e寿命(いずれも532 nmレーザー光源での値)を達成した。また、加速器への実装に必要な成膜装置の製作を行い、試験運転を開始した。また愛知県岡崎市の分子科学研究所 極端紫外光研究施設(以下、「UVSOR」という。)において、紫外域放射光による光電子分光(Ultra Violet Photoelectron Spectroscopy、以下UPS)を用いたマルチアルカリカソードの表面分析実験を開始した。レーザー蓄積装置のフィードバック技術開発に関して、共振器の蓄積効率向上のため、高反射率鏡の取り扱いおよび洗浄方法の最適化、共振器の振動特性の調査方法の開発および、フィードバック技術におけるデジタル方式導入のための開発を行った。

③-1 新マルチアルカリ光カソードの開発状況

セシウムカリウムアンチモン(以下CsK₂Sb)による緑色励起可能で、かつ高耐久な光カソードの開発のためには、極高真空中においてカソードを薄膜生成し、大気にさらすことなくそのまま特性等を評価する必要がある。最終的には、量子効率と寿命を最適化しなくてはならないが、寿命の評価はカソード生成後に事後的に明らかとなるため、カソードの最適化は、初期量子効率を指標として、各々の物質の蒸着膜厚、蒸着時の温度をパラメーターとしておこなった。また、国立大学法人広島大学では既存の試験装置に、カソード生成基板上で量子効率を二次元的に評価するため、既存の二次元スキャン装置に自動測定機能を加えた。その測定例を③-図1に示す。ここでは、測定に実用化の場合に利用が想定される532 nmの緑色レーザーを使用している。周辺部分は、基板が存在しない場所、あるいはビューポートの縁によりレーザー光が遮られており、そこでは量子効率はほぼ0となっている。全体的には1.0%を超える値が測定されており、さらに中心付近では2.0%を超える高い量子効率が計測されている。この値は実用レベルであり、一定の評価ができる。他方、加速器での実用化を考慮した場合、量子効率の大きさとともに、量子効率の均一化も重要である。このカソードの生成時には、ある点での量子効率が最大となるように蒸着量を制御しており、今後、蒸着中も二次元的に量子効率を評価するなど、量子効率のピーク値とともに、均一化も課題である。

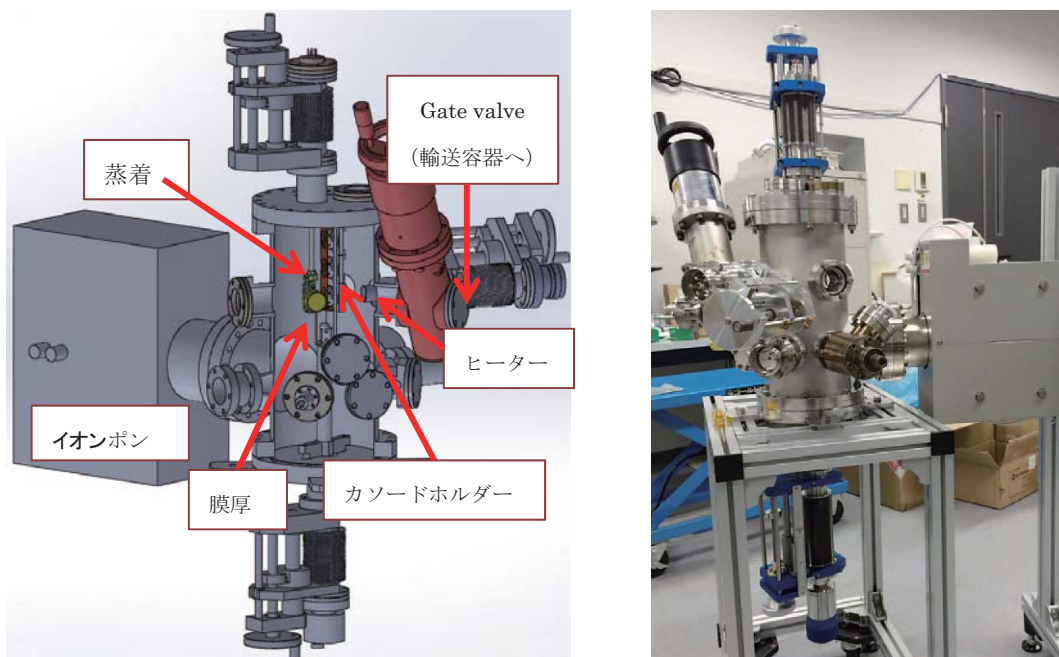


③-図 1. 532 nm のレーザーで測定した CsK₂Sb カソードの量子効率分布。中心付近で 2% を超える値が測定されている。



③-図 2. 量子効率 (532 nm レーザーにて測定) の時間変化。これより 1/e 寿命を求めると、およそ 1450 時間となった。

③-図2には、量子効率の時間変化を示す。量子効率は532 nmの緑色レーザーで、およそ2時間毎に測定した。実効的な平均引出電流は数 nA 以下であり、電子引出による劣化等は無視できると仮定した。このデータから1/e寿命を求めると1450時間となり、およそ60日である。これは典型的な加速器のメンテナンス周期の2週間よりも十分に長く、時間的な寿命という点からは、十分に実用化レベルにあるといえる。

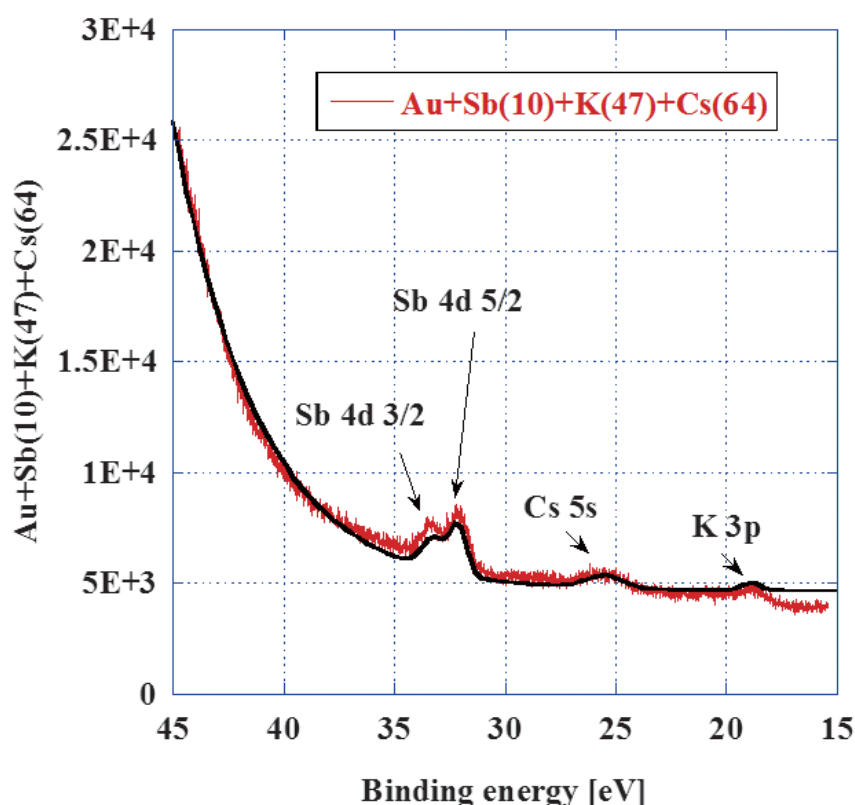


③-図3. 加速器への実装に対応したマルチアルカリ蒸着装置(左がCADによる図面、右が写真)。パック上にカソードを蒸着生成し、それを真空維持したまま別の容器へと輸送する。

③-図3には、加速器への実装に対応したマルチアルカリカソード蒸着生成装置の概要をしめす。容器はイオンポンプ等で真空に維持されており、その中でカソード蒸着を行う。カソードはパックと呼ばれるステンレス鋼材(SUS)製の金属部品上に生成し、パックを加速器に移動することで、カソード生成と加速器との干渉を解消し、より最先端の研究成果を加速器に迅速に導入する体制が実現する。真空を維持したままパックは加速器まで輸送しなくてはならないため、小型のイオンポンプ等を備えた輸送容器も別途設計し、製作を終えている。蒸着装置は基本的な真空性能の確認を終え、平成27年度に蒸着試験および輸送試験を予定している。

③-図4には、マルチアルカリカソードの表面分析のため、分子科学研究所 UVSOR にて取得したCsK₂SbのUPSスペクトラムの例をあげる。用いた光は59 eVであり、アンチモンSb(4d)、セシウムCs(5s)、カリウムK(3p)とみられるピークが観測された。サンプルはケイ素(Si)基板上に金(Au)を蒸着したものの上に、さらにCsK₂Sbを薄膜生成したものである。アナライザーがまだ調整途中であり、またサンプルの生成条件も最適化されておらず、分解能はまだ低い。調整を進め、分解能を改善したうえで、蒸着条件、紫外線(UV)光による量子効率、劣化の進み具合などとUPSスペクトラムとの比較を行うことで、最適条件および劣化プロセス

の表面科学的理解を進めていきたい。また、同測定ビームラインには低速電子線回折装置（Low Energy Electron Diffraction、以下 LEED）も設置されており、結晶性の評価が可能である。蒸着生成条件、結晶性とカソード性能との関係も、今後研究を進めていく予定である。2015 年度もビームタイムを確保しており、研究を進めていく。



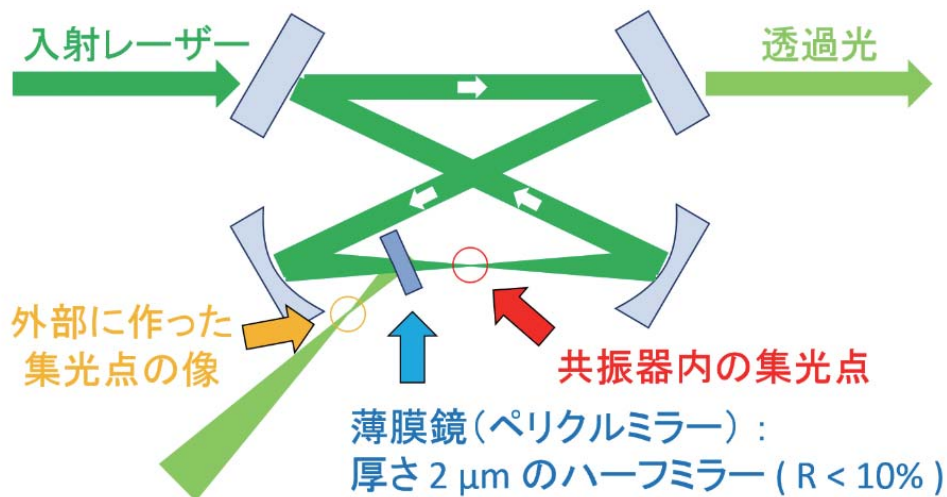
③-図4. CsK₂Sb の UPS スペクトラムの例。Si 基板の上に Au を真空蒸着し、その上の CsK₂Sb をやはり蒸着生成した。Sb (4d) , Cs (5s)、K (3p) と思われるピークが見られる。

③-2 レーザー蓄積共振器開発における状況

レーザー蓄積共振器の蓄積効率の増大のためには、高反射率鏡による共振器を構成し、その共振器長を高精度で制御する必要がある。平成 26 年度は、高反射率鏡の導入するために必要な技術開発に重点をおいた。具体的な項目は以下の通りである。

1. 平成 25 年度に行った共振器内における光学特性の系統的測定を継続し、その理解のためのデータを取得。
2. 高反射率鏡の評価およびその取り扱い方法の確立。
3. 共振器の周波数応答測定システムの構築とデータ取得。
4. デジタル制御装置の開発。

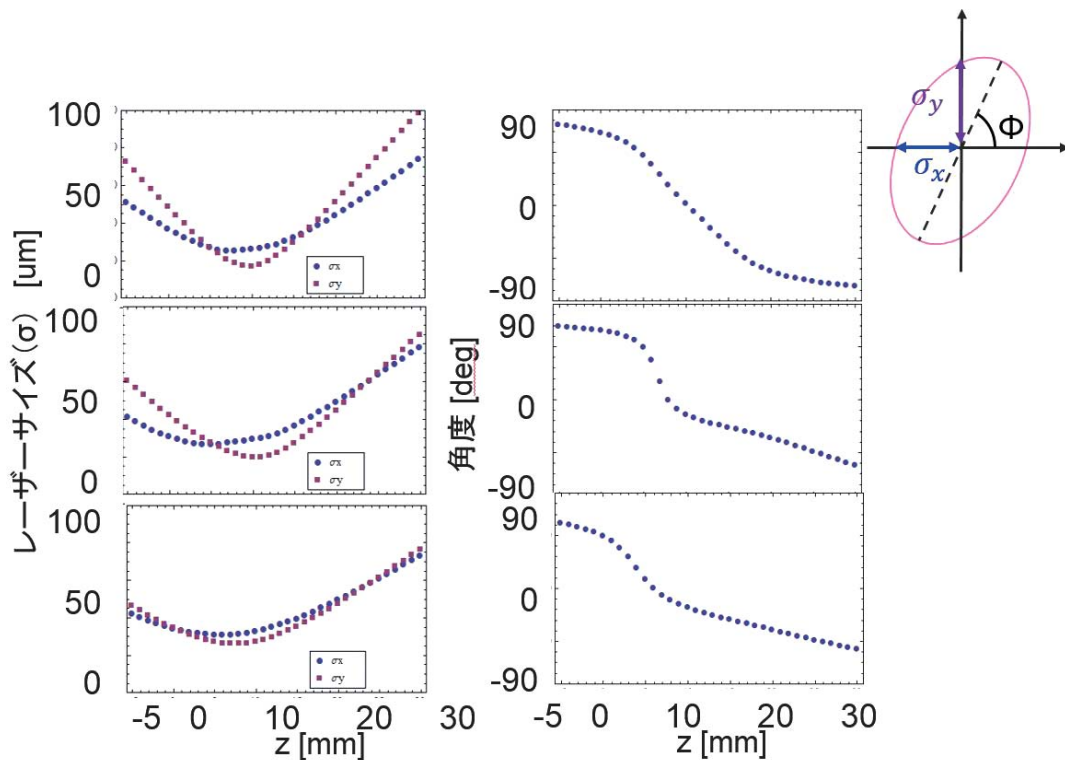
以下にそれぞれの項目について述べる。



③-図5. 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。

③-2.1 光共振器の集光点近傍の形状の測定

光共振器における強度増大率を上げるためには、共振器内におけるレーザー光の特性を正確に把握し、その光学特性を理解することが必要である。特にレーザー光をできるだけ小さく集光する場合や増大率を高くする場合に重要となる。この目的で平成25年度より集光点付近のレーザー光の形状の系統的な測定を行ってきた。平成26年度はそれを継続し必要なデータを取得した。③-図5は形状測定概念図である。（平成25年度の報告書にも掲載）共振器の集光点近傍の像を薄膜鏡によって共振器外部に取り出して形状を測定している。③-図6に測定結果を示す。③-図6左図は、集光点近傍における、レーザー光の水平、垂直方向の大きさ（ σ ）である。これらが最少となるところが、集光点であるが、水平、垂直方向では最小点が一致しないこと、また、集光サイズが小さくなるほどその違いが大きくなる傾向がある。同左図は、楕円形のレーザー形状の長軸と水平方向の間の角度である。レーザー光は、伝搬しながら回転していること、また集光点近傍で大きく角度が変化している。現在の課題は、特に集光サイズが小さい場合にこの振る舞いを光学計算から再現できていないことであり、現在も検討を行っている。しかし、共振器の設計の観点では、集光サイズがある程度（およそ $30 \mu\text{m}$ ）以上であれば、現在の設計手法でも実用上は問題ないことも確かめられている。



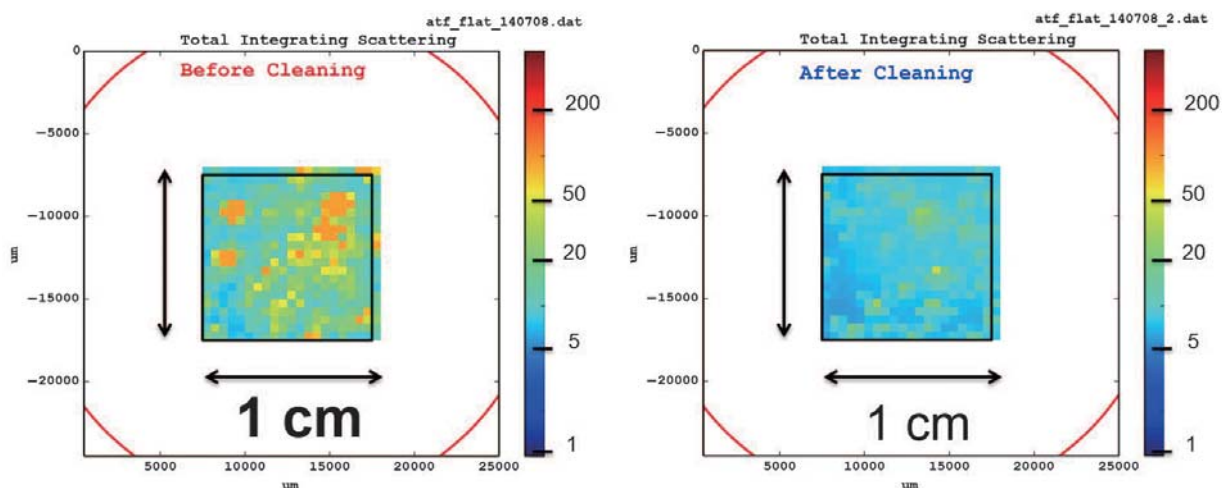
③-図6. 薄膜鏡で測定した。共振器内部のレーザー形状。上から最小軸長さ、15 μm 、20 μm 、25 μm 。右図は、水平方向と垂直方向の大きさ。右図は楕円長軸と水平軸の角度である。それぞれの定義は右上図に示している。

③-2.2 高反射率鏡の評価とその取り扱い方法の確立

光共振器における蓄積強度増大率を向上するために、高反射率鏡を導入する必要がある。現在高エネルギー加速器研究機構の ATF 加速器に導入している共振器は、鏡の反射率が 99.99%、フィネス 4300、強度増大率 1200 である。この共振器において反射率 99.999% の鏡を導入し、フィネス、増大率ともに 10 倍程度の増強をめざしている。このような高反射率鏡においては、その表面に付着するわずかな不純物が反射率を低減させ、本来の性能を得ることができなくなる。これまでの経験より、メーカーからの輸送中に表面が汚染され、購入後最初に開封した直後であっても反射率が劣化することがあることが分かっている。したがって高反射率鏡を導入する際には、独自に評価できる手法を得ると共に、その取り扱い方法も確立しておく必要がある。このため、国立天文台と協力して、平成 25 年度に購入した反射率 99.999% の鏡を評価するとともに、その取り扱い方法の最適化を行った。

③-図7は AT Films 社より購入した、高反射率鏡を国立天文台の散乱測定装置によって評価したものである。この装置は、参照光を鏡に照射して、表面による乱反射を測定する。鏡表面に不純物が付着するとそこで光が乱反射されるため、これにより鏡表面の清浄度を評価できる。左は同社より購入後未開封で保存し、測定直前に開封したものである。同社による散乱の保証値は 10 ppm 以下であるが、平均値は 23.4 ppm とそれを大きく越えており、また散乱の大きい場所もある。この鏡を 2-プロパノールによって洗浄した。実際には光学用拭紙に 2-プロパノール

を含ませ、鏡表面を拭くという操作である。作業はクリーンベンチ（平成 25 年度に本経費で導入）内で行っている。③-図 7 右は洗浄後の結果を示している。平均値は 9.3 ppm であり、メーカーのカタログ値を満足している。この結果を元に、平成 27 年度は国立天文台において開発された鏡表面の散乱測定システムを国立大学法人広島大学においても構築することを計画している。

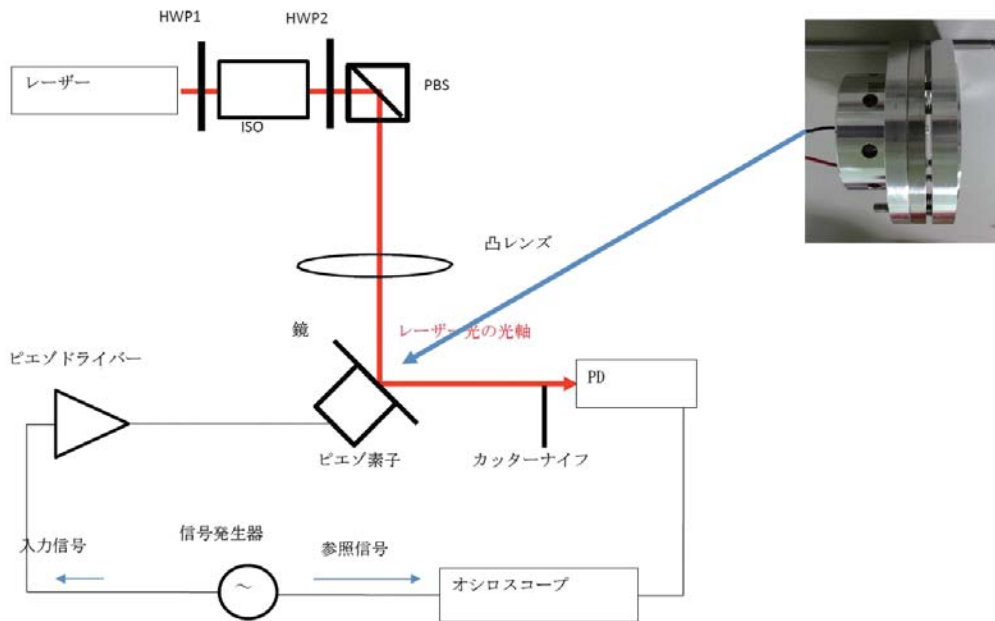


③-図 7. 国立天文台に於いて測定した、ATFilms 社製、反射率 99.999% の鏡表面の乱反射測定。右図は購入後、最初に開封した直後。平均で 23.4 ppm の乱反射がある。右図は鏡に洗浄後、乱反射は 9.3 ppm であり、業者のカタログ値を満足している。

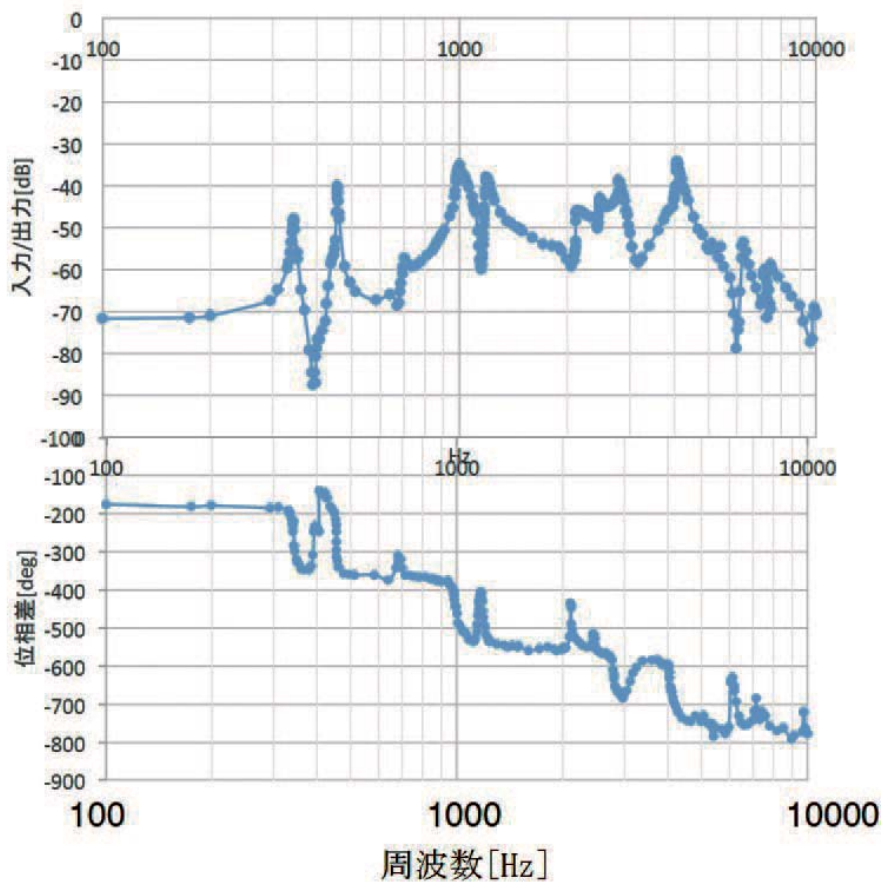
③-2.3 共振器の周波数応答測定システムの構築とデータ取得

高反射率鏡によって共振器を構成する場合、その制御精度の向上が課題である。現在 KEK-ATF に導入している共振器は約 14 pm の精度で制御を達成している。

現在計画している、高フィネス共振器では 10 pm 程度の精度が要求されると考えられている。そのためには、現状の制御システムの根本的な再構築は必要としないが、共振器本体はその環境の機械特性を考慮にいたした制御システムの改善が必要である。また、将来より高精度の制御を旨とするにおいても、共振器の振動特性は制御システム構築の基本的パラメータとして必要な情報である。そのため、平成 25 年度に国立大学法人広島大学に導入した共振器を用いて、その振動特性の測定を行った。③-図 8 はその測定方法の概念図である。共振器の鏡はミラーホルダー内の圧電素子によって動き、それによって共振器全体の光路長が変化する。信号発生器によって発生した基準信号をミラーホルダーに載せた圧電素子に与え、それによる鏡の変位を測定した。鏡の変位は、それに照射したレーザー光の位置変化によって測定する。③-図 9 に信号発生器の周波数を変えながら、圧電素子に与えた信号と鏡の変位の比及び、位相のずれを測定したものを示す。これから、ミラーホルダーの機械的な振動特性、特に共鳴点の場所と大きさを把握することができる。これを元に、ミラーホルダーの改造や制御システムの構築を行う。



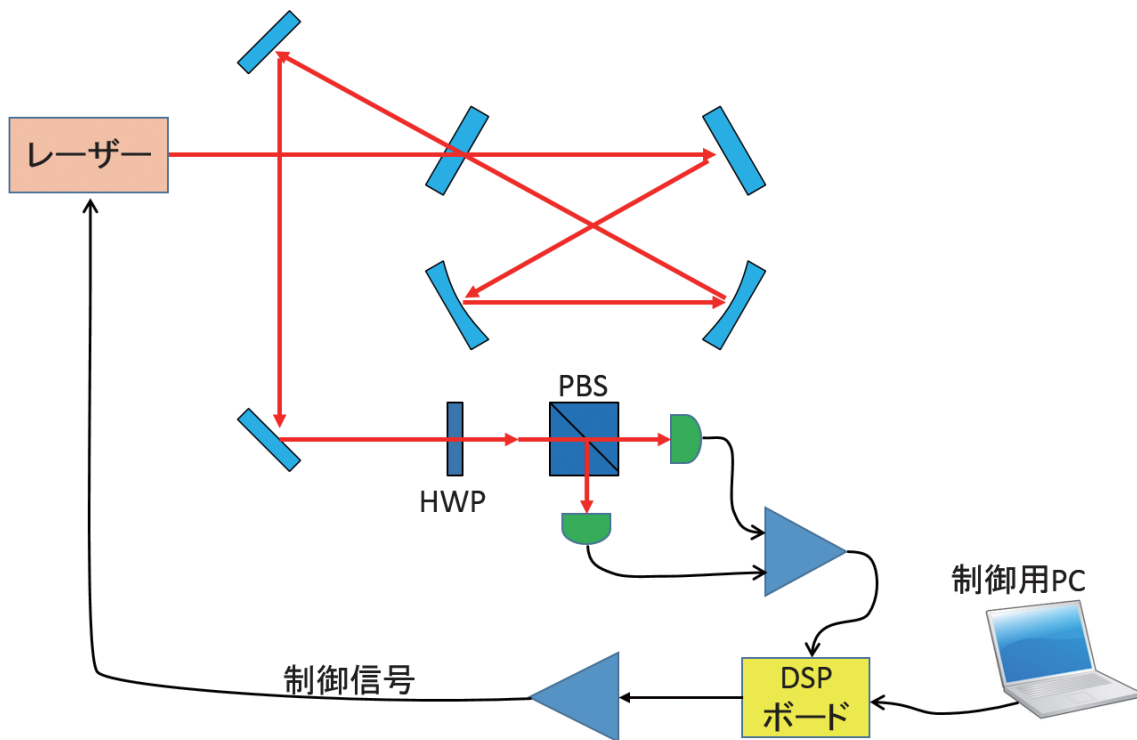
③-図 8. 周波数応答測定の設定アップ。信号発生器からの信号によって圧電素子を駆動し、それによって生じた鏡の変位をレーザー光の変位として測定する。



③-図 9. 周波数応答測定結果。圧電素子に加えた駆動信号と鏡の変位の比（上図）、および、駆動信号と変位信号の位相差（下図）。ミラーホルダーの特性による共振が観測されている。この結果をもとに共振器の改良や制御システムの設計を行う。

③-2.4 デジタル制御装置の開発

制御系のデジタル化は、制御システムの多チャンネル化や異なるパラメータへの対応など、制御システムの効率的な設計と運用に有効である。一方で早い周波数応答が必要な場合はアナログ制御が妥当であるため、両者を融合したシステムが有効であると考えられる。そこで③-2.2における、周波数特性の測定結果も考慮して帯域数 kHz デジタルシグナルプロセッサ（DSP）が妥当である判断した。パソコンに接続可能な 8 入力 6 出力、帯域が最大 50 kHz の DSP ボードを購入して、ソフトウェア的フィードバック制御用のサーボ回路を設計した。



③-図 10. デジタル制御装置の構成図。アナログ方式における、制御信号発生部分を、図中 DSP ボードに置き換え、デジタル処理によって制御信号を生成する。

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)

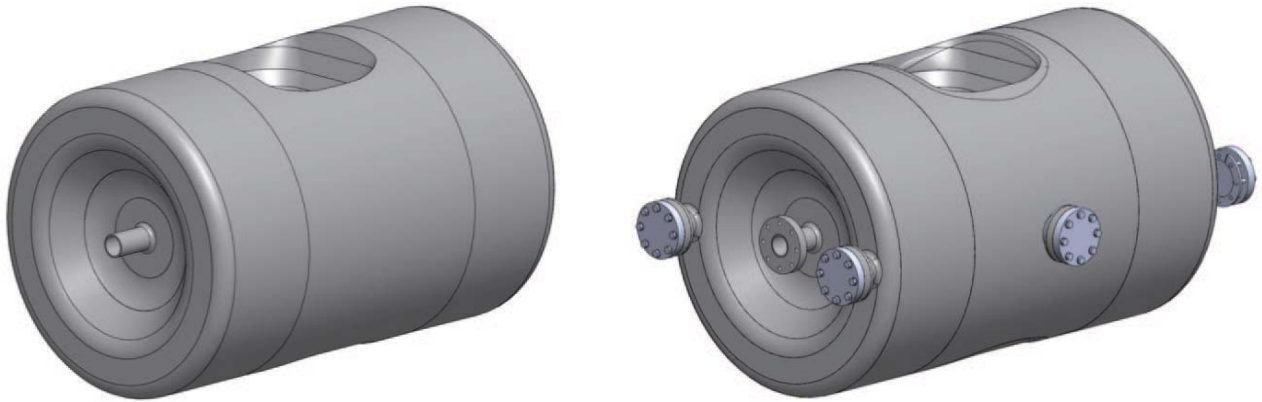
概 要

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が小さいこと、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エネルギー回収型リニアックとして用いる場合に利点大きい。これまで小型高輝度 X 線光源のための電子加速器用のスポーク空洞の形状設計を行ってきたが、平成 26 年度は、マルチパクティングのシミュレーション結果を反映した最終形状を決定するとともに、スポーク空洞を製作するのに必要なポート形状やサポート形状の設計を行った。さらに製作工程の第一段階であるプレス成型加工のための金型の設計を行った。また、高量子効率カソードの研究開発については、前年度に設計した成膜装置を 250kV-50mA 光カソード電子銃と接続し、その後、成膜装置内部の組み立てを行い、Cs₃Sb 光カソードの成膜試験を行った。波長 532 nm のレーザーに対して量子効率 0.37% を得た。

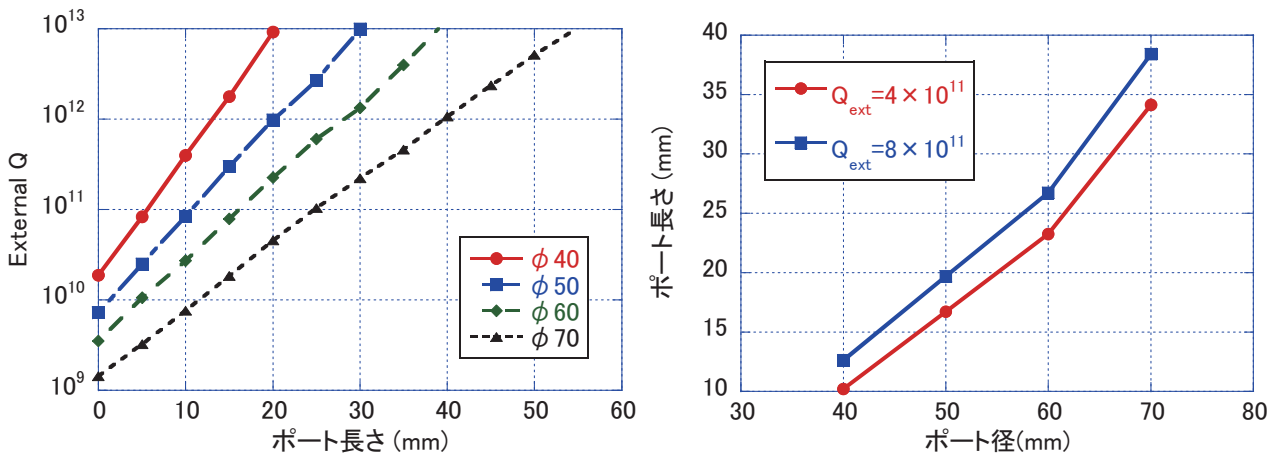
④-1 スポーク空洞の開発

【スポーク空洞形状設計】

平成 26 年度はマルチパクティング（共鳴電子増倍）の計算機シミュレーション結果を反映して、タンクコーナーの丸めやスポーク根元の丸めなどの空洞形状を改良するとともに、スポーク空洞を実際に製作するために必要な設計を行った。形状設計に用いたモデルは④-図 1（左）のようにビームパイプのみの構造であったが、実際に製作し、表面処理や縦測定等を行うためには、④-図 1（右）のように空洞側面や端板にポートを取り付ける必要がある。各ポートは空洞の Q 値に影響を及ぼさないように十分な長さを取る必要がある。端板のポートには長さを制限する要因はないが、タンク側面のポートに関しては、縦測定を行うクライオスタットの大きさがポートの長さを制限する。現在想定している縦測定用クライオスタットの直径は 800 mm であり、空洞をクライオスタットに入れるときの余裕を考慮してポート付の最大外径を 770 mm 以下にする必要がある。ニオブの残留抵抗を 14 nΩ と仮定すると BCS 抵抗と合わせた表面抵抗は 42.3 nΩ となり、この時の空洞 Q 値は 3.9×10^9 となる。ポートを 2 個取り付け、ポートによる影響を 1/100 以下にするためには、1 ポート当たりの外部 Q 値を 8×10^{11} 以上にする必要がある。3 次元電磁場解析コード MW-STUDIO を用いてポート形状とそのときの外部 Q 値の計算を行った。ポート長さに対する外部 Q 値をポート直径ごとにプロットしたものを④-図 2（左）に、外部 Q 値を一定にしたときのポート直径とポート長さの関係を④-図 2（右）に示す。この結果から φ50 のポートであれば 20 mm 以上の長さで外部 Q 値を 8×10^{11} 以上にすることが可能で、ブランクフランジやネジ等の大きさを考慮しても、最大外径を 770 mm 以下にすることが可能である。



④-図 1. 形状設計モデル (左) とポート付の製作モデル (右)。

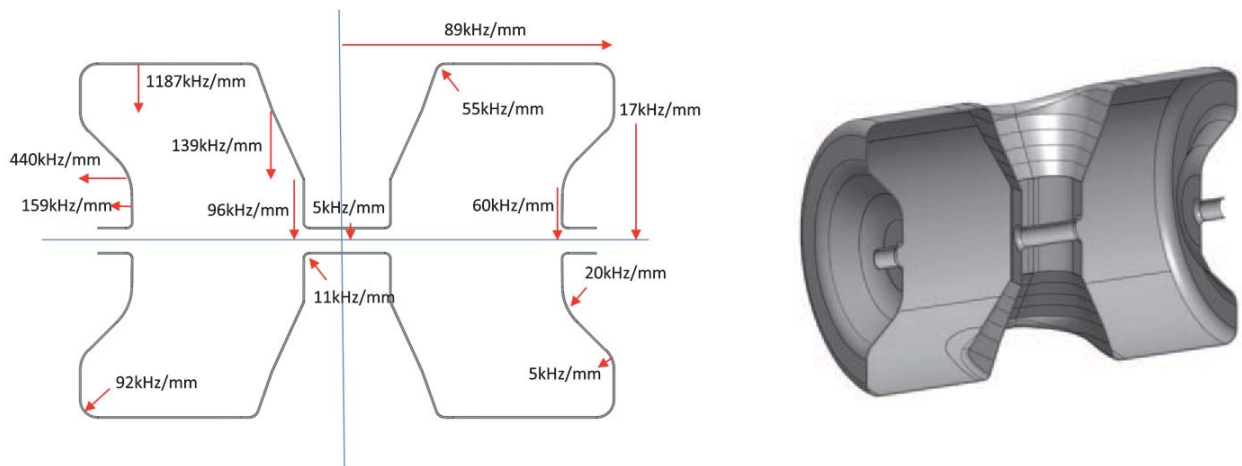


④-図 2. ポート長さとポート直径の変化による外部 Q 値の変化。

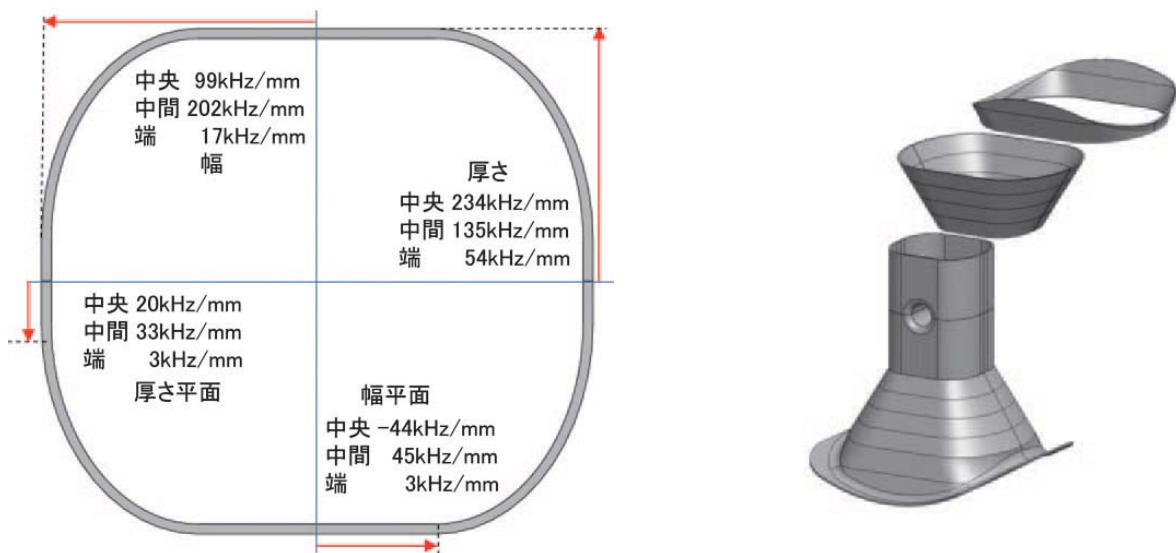
【スポーク空洞の製作精度】

スポーク空洞を製作するにあたって寸法誤差による空洞周波数への影響を調べた。スポーク空洞で各形状寸法を変えた時の周波数変化を 3 次元電磁場解析コード MW-STUDIO を用いて計算を行った。スポーク空洞形状を変化させた時の周波数変化を④-図 3、4 に示す。図中の数字と矢印はその方向に形状寸法を 1 mm 変化させた時の周波数変化である。楕円空洞との比較を表 1 に示す。楕円空洞は TESLA 空洞で計算を行ったが、TESLA 空洞の周波数は 1.3 GHz と違うため、325 MHz のスポーク空洞との比較のため楕円空洞の周波数変化を 1/4 にしてある。この結果から、スポーク空洞は楕円空洞に比べて周波数変化が小さいこと、またスポーク空洞で周波数変化に大きく影響するのは外径であることが分かる。

また化学研磨などの表面処理により空洞寸法が変化するが、空洞内面が 1 mm 均等に削られた場合の周波数変化はスポーク空洞で -737 kHz、楕円空洞で -2080 kHz と見込まれており、表面処理による周波数変化もスポーク空洞の方が影響が少ないことが分かる。



④-図 3. スポーク空洞側面の形状変化による周波数変化。



④-図 4. スポーク断面の形状変化による周波数変化。

④-表 1. 空洞寸法変化による周波数変化。

形状変化	スポーク空洞	楕円空洞
外径	1190 kHz/mm	3480 kHz/mm
セル長	89 kHz/mm	470 kHz/mm
ボア径	5 kHz/mm	1000 kHz/mm
エンドノーズ	440 kHz/mm	—
断面形状	< 230 kHz/mm	—
楕円形状	—	780 ~ 1120 kHz/mm

325 MHz スポーク空洞と比較するため、楕円空洞の周波数変化を 1/4 倍している。

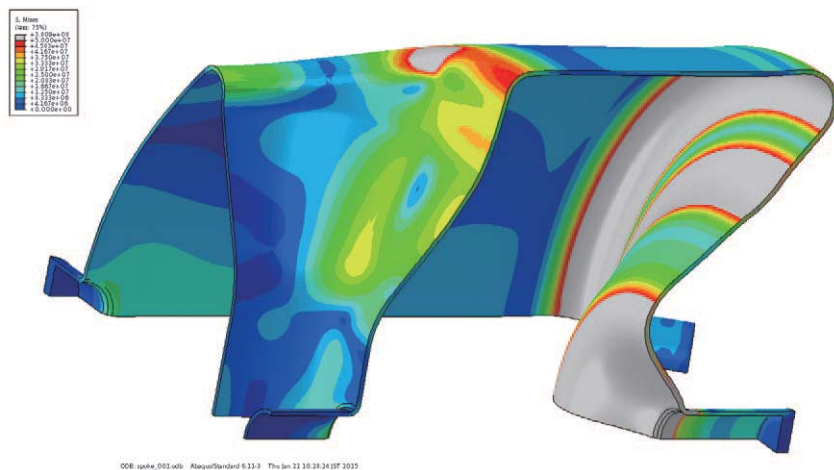
【スポーク空洞の機械強度設計】

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構造解析ソフト ABAQUS を用いて行った。空洞内を真空引きした状態でサポートを入れない場合は④-図5のように端板とスポーク根元に大きな応力がかかる。

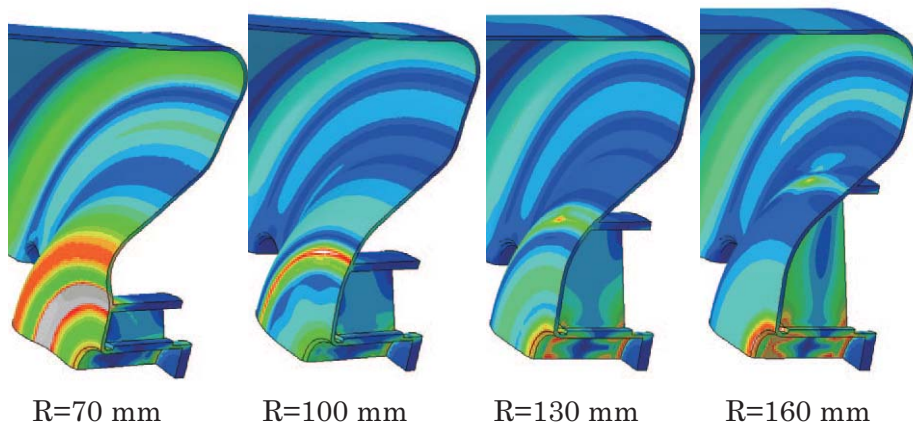
端板に関して、円周方向リブとビームパイプを放射状につなぐリブによるサポートを考える。製作時の溶接を簡略化するために端板との接続は円周方向リブのみとする。円周方向リブの半径を変えた時の端板の応力分布を④-図6に示す。円周方向リブの半径が大きくなるにしたがって端板中央の応力が減少し、ビームパイプ部分の応力が増加していく。

スポーク根元のサポートに関して④-図7のような3種類のサポートを比較した。そのときのスポーク根元の応力分布を④-図8に示す。

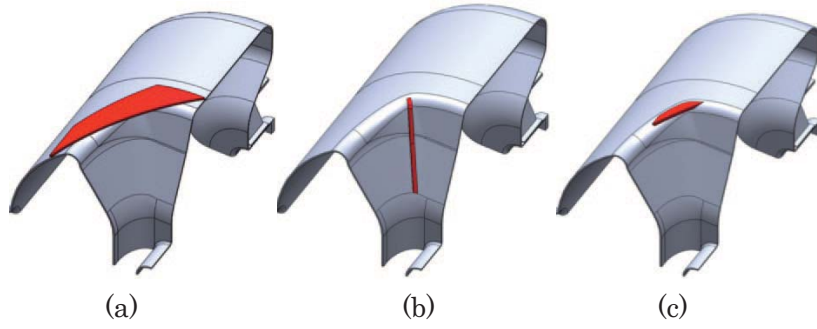
端板は製作後に塑性変形による周波数調整、さらには運転時のチューナーによる弾性変形による周波数調整に使われるため、変形に必要な力を調べた。円周方向リブの半径を変えた時の空洞のばね定数を④-図9に示す。ばね定数は半径 100 mm 以上ではほぼ一定になる。



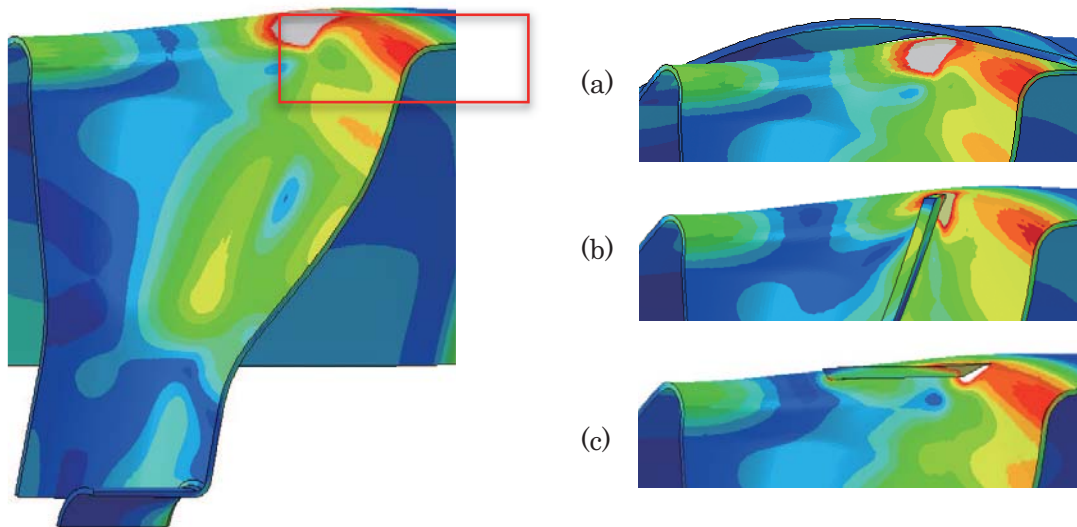
④-図5. サポートがない場合の真空耐圧によるスポーク空洞の変形図とミーゼス応力分布。



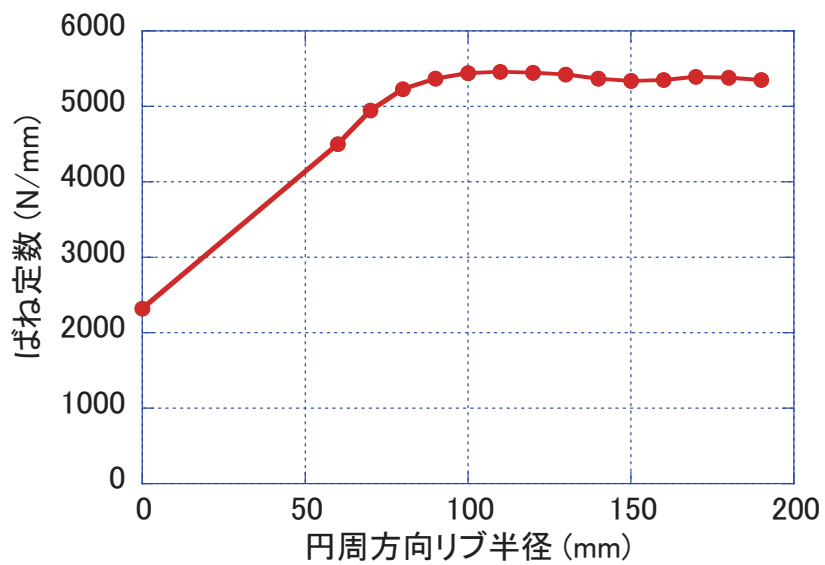
④-図6. 円周方向リブの半径を変えた時の端板の変形図とミーゼス応力分布。



④-図7. スポークの根元のサポート形状案（赤色部分がサポート）。



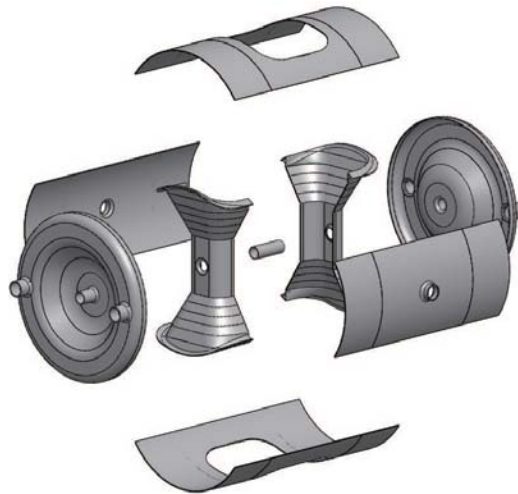
④-図8. スポーク部分の変形図とミーゼス応力分布。サポートがない場合(左)と図7のサポート(a,b,c)を付けた場合(右)。



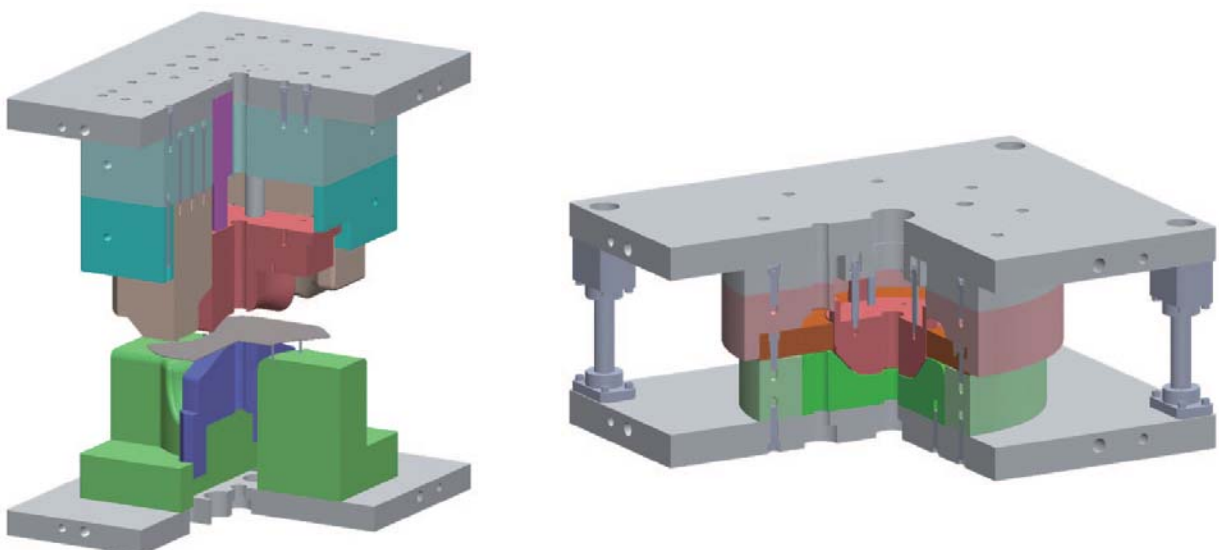
④-図9. 端板サポートを付けた場合のスポーク空洞のばね定数。

【金型設計】

スポーク空洞を製作する場合、ニオブシートの大きさを考慮して④-図 10 のように分割して成型することを検討している。各部品は製作工程の第一段階としてプレス加工により製作する。スポークに関しては、プレス加工でハーフスポークに成型し、不要部分をトリミングして、2 個のハーフスポークを合わせることでスポークを製作する。端板に関してはプレス加工でタンクとの接続部分まで成型加工する。これらのプレス成型加工のための金型の設計を行った。プレス加工においてはプレス時の割れやしわの発生を防ぐとともに、加工後の製作精度を確保するための金型形状や加工工程の検討を行った。設計した金型を④-図 11 に示す。ハーフスポーク、端板とも 2 段階の加工により最終形状に成型することになっている。



④-図 10. スポーク空洞製作のための分割。



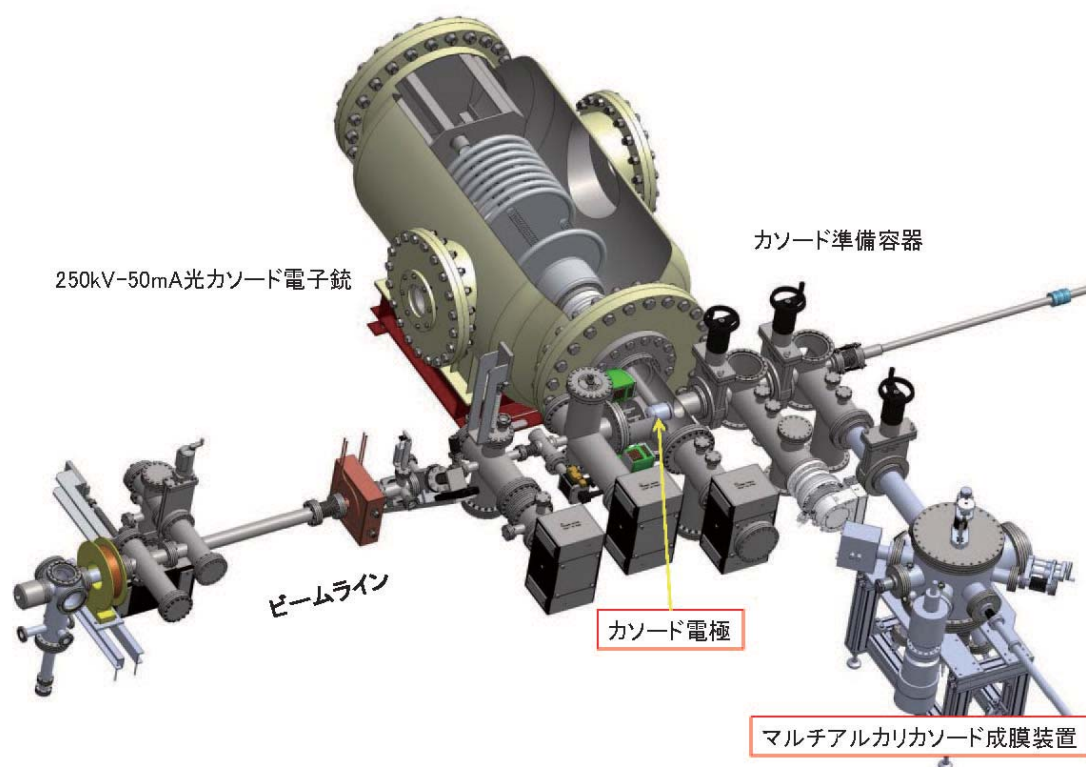
④-図 11. スポーク空洞製作のためのプレス成型金型。ハーフスポーク用（左）と端板用（右）。

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。

本研究開発においては、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、実際的な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。本年度はマルチアルカリカソード成膜装置を 250 kV 電子銃に接続し、1.5 m トランスファーロッドによる電子銃と成膜装置間のカソードパックの輸送試験を行った。成膜に必要なシリコン基板をインジウム接着したモリブデン製パック、回転パックホルダー、タングステンヒーター、膜厚計、アンチモン蒸着用モリブデンボート、セシウム源を成膜装置に組み込んだ。成膜に必要な極高真空を達成するため、非蒸発型ゲッター (NEG) ポンプとイオンポンプを組み込み、NEG ポンプの活性化後、真空度 5×10^{-9} Pa を達成した。成膜時に必要なタングステンヒーター及びアンチモン蒸着用ボートの温度校正を行った。Cs₃Sb 光カソードの成膜を行い、量子効率 0.37% を波長 532 nm で達成した。

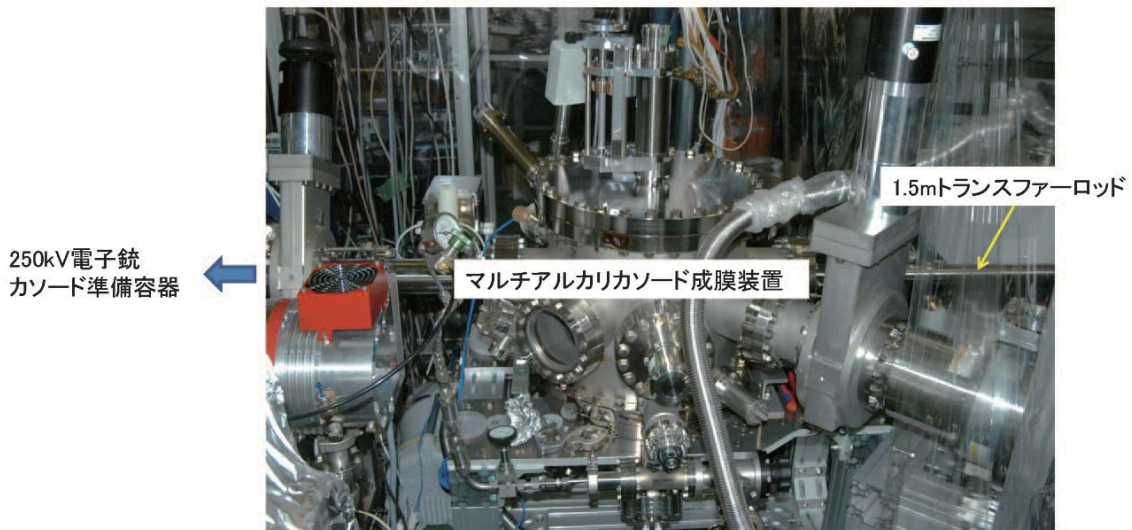
平成 27 年度以降の電子ビーム生成試験のため、成膜装置で用いたカソードパックをインストールできる電子銃電極を製作した。



④-図 12. 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。

【高効率・長寿命性能試験のための電子銃システム】

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。平成 25 年度に全体設計（④-図 12）を行った。本設計に従い、平成 26 年度は④-図 13 に示す。成膜装置をカソード準備容器に接続した。成膜装置の 1.5 m トランスファーロードを用いて、カソード準備容器と成膜装置間のカソードパックの移送試験を行い、所定の動作を確認した。

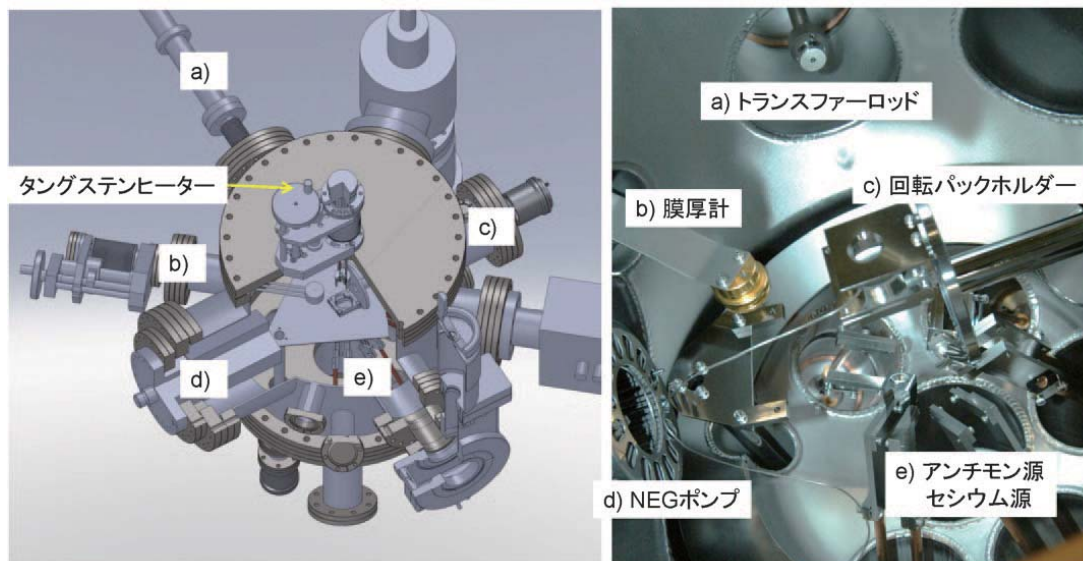


④-図 13. マルチアルカリカソード成膜装置を図 1 の設計通り 250 kV 電子銃カソード準備容器に取り付けた。1.5 m トランスファーロードを用いたカソードパック輸送試験も行った。

【マルチアルカリカソード成膜装置】

平成 25 年度に設計したマルチアルカリカソード成膜装置を④-図 14 左に示す。平成 26 年度は設計に基づき、各部品製作、組み立てを行った。装置内部の様子を④-図 14 右に示す。成膜カソードパックを 250 kV 電子銃カソード準備容器に移送するための a) トランスファーロード、c) 回転テーブルに取り付けられたカソードパックホルダー、b) 成膜のための膜厚計、e) 蒸着源、d) 極高真空のための非蒸発型ゲッター（NEG）ポンプが取り付けられている。成膜時には、カソードパックの成膜面が蒸着源を向くように回転テーブルを設定する。④-図 14 左のタンガステンヒーターにより、カソードパックを昇温する。④-図 15 に製作したモリブデン製パックの写真を示す。パックは cERL と互換性があり、超高真空を保持したまま輸送するスーツケースシステムを用いることで、cERL のビーム生成試験に用いることも可能である。基板はコーネル大学などで実績のあるシリコンを選択した。モリブデンパックとインジウムで接着しており、タンタル製キャップを被せてある。

マルチアルカリカソード成膜装置



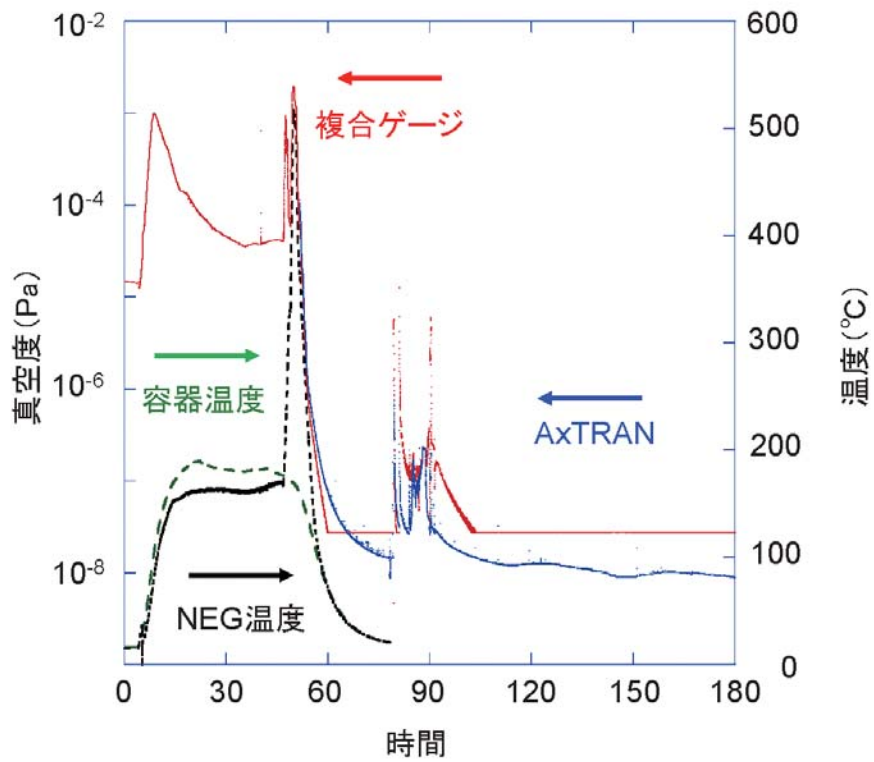
④-図 14. マルチアルカリカソード成膜装置の設計（左）と製作組み立て（右）。

シリコン基板 (Mo製パック)

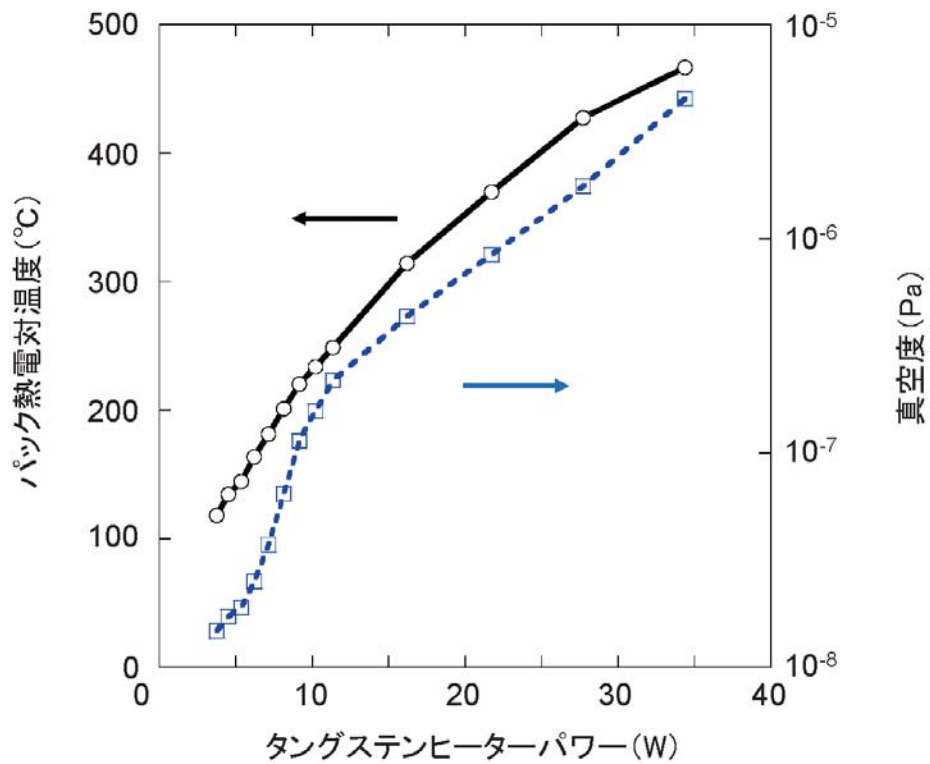


④-図 15. アルキリアンチモン蒸着のためのシリコン基板をモリブデン製のパックにセットした。モリブデンパックは cERL と互換性のある設計となっている。

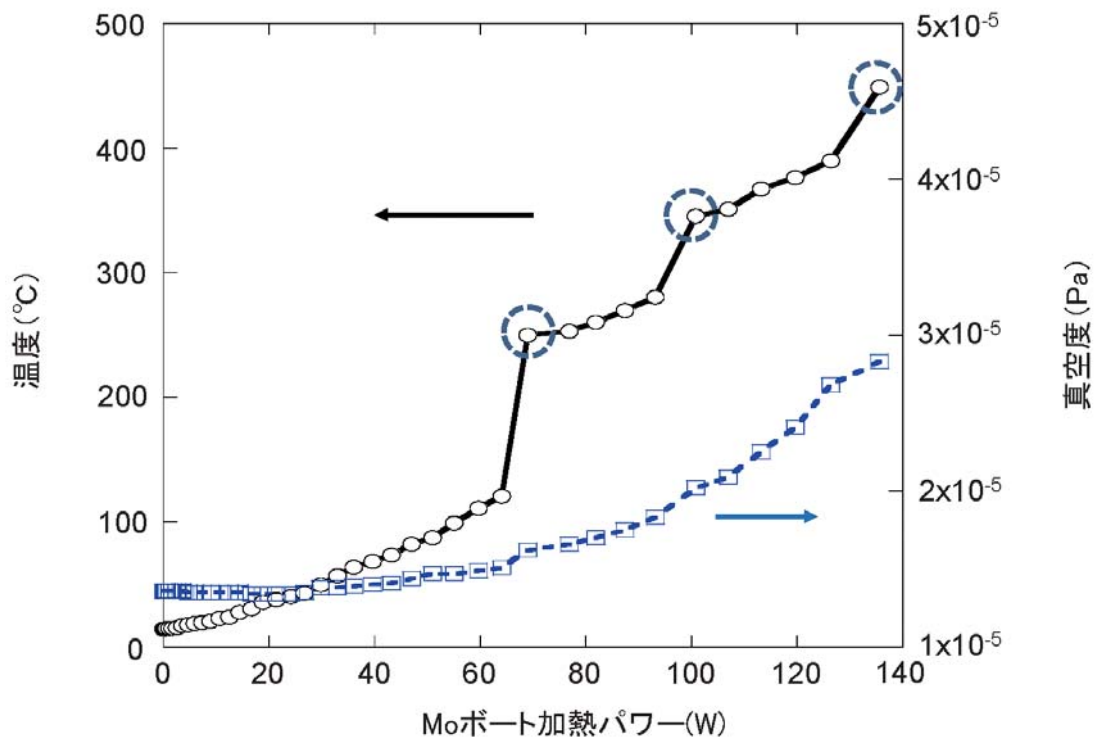
装置の組み立て後に実施した成膜装置ベーキングの様子を④-図 16 に示す。160℃程度で 24 時間のベーキングを実施し、イオンポンプの起動、NEG ポンプの活性化を行いながら降温させ、数日後に 10^{-9} Pa 台の真空度を達成した。④-図 17 は、タングステンヒーターの温度校正結果を示す。カソードパックの基板をセットする位置に熱電対を挿し込み測定した。シリコン基板の熱洗浄には 550℃、アンチモン蒸着時には 170℃、セシウム蒸着時には 130℃まで加熱する。温度校正データを参考にタングステンヒーターパワーを決定する。④-図 18 はアンチモン蒸着用のモリブデンボートの温度校正データである。350℃付近でアンチモンの蒸発が始まる。3 箇所丸印では、時間をかけて温度測定を行ったため、校正データの信頼性は高い。



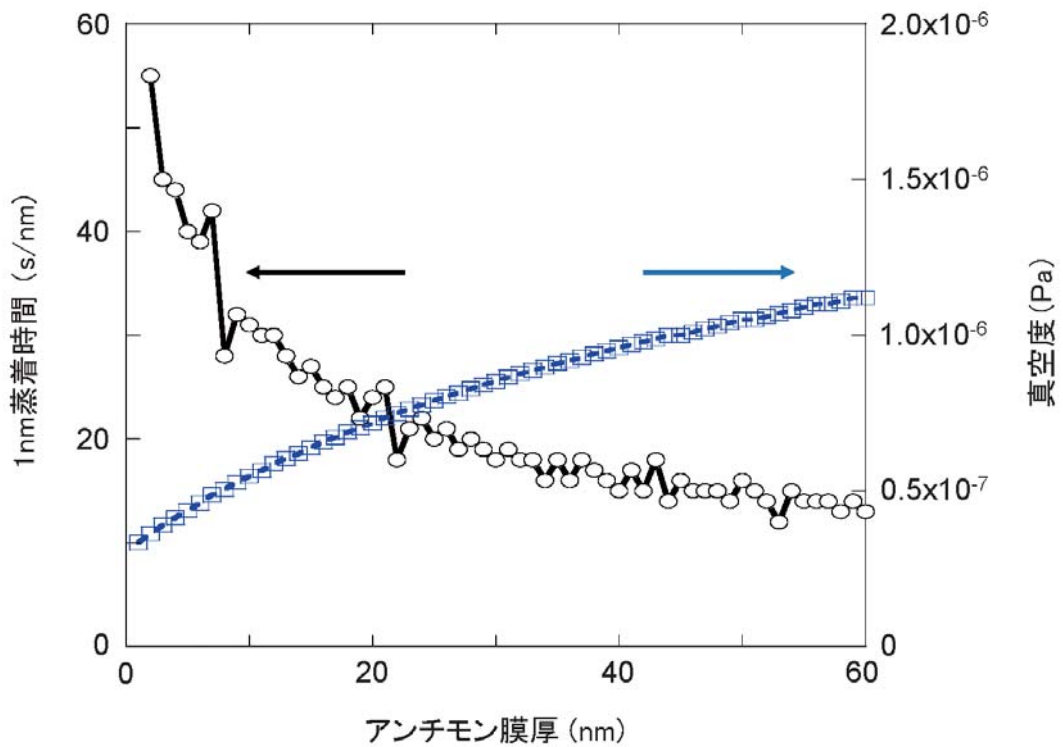
④-図 16. マルチアルカリソーダ成膜装置のベーキングと NEG 活性化の様子。ベーキング後すぐに 1×10^{-9} Pa に到達する。最終的には 5×10^{-9} Pa。



④-図 17. タングステンヒーターの温度校正。モリブデンバックに熱電対をセットし、ヒーターで加熱しながらパワーを上げて温度測定を行った。

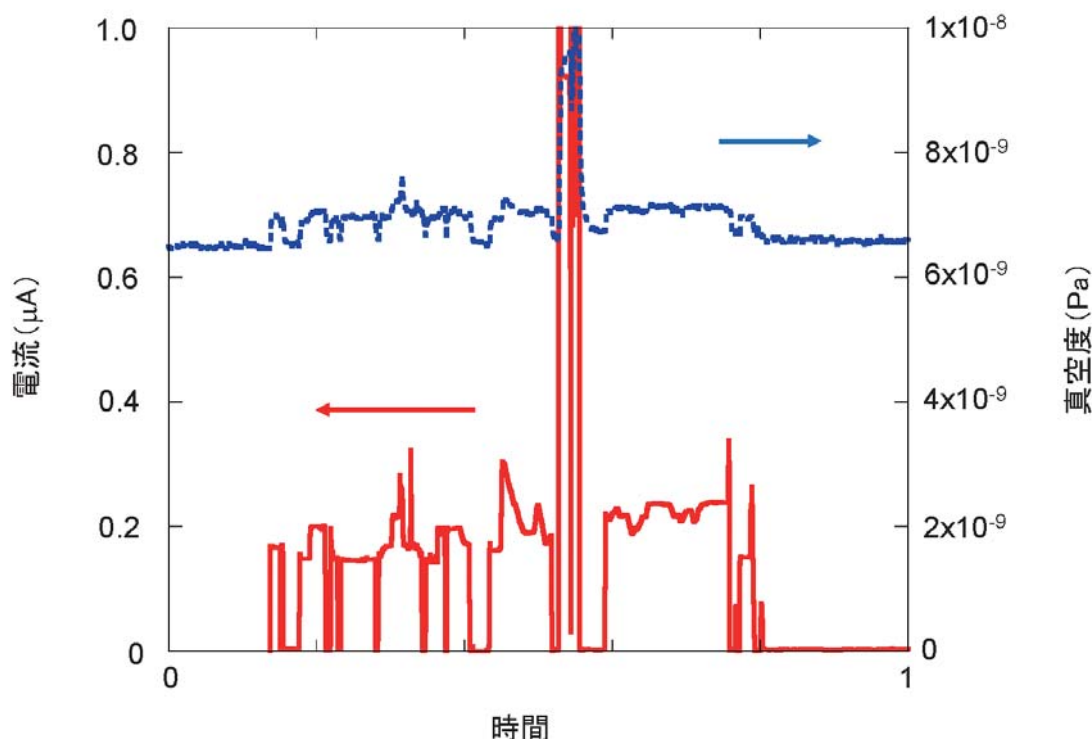


④-図 18. アンチモン蒸着用のモリブデンボートの加熱試験。ボートに熱電対を接触させて温度を測定しながら、加熱パワーを上げた。



④-図 19. 膜厚計試験結果。膜厚の関数として、1 nm 蒸着するのに要する蒸着時間とその時の真空度をプロットした。

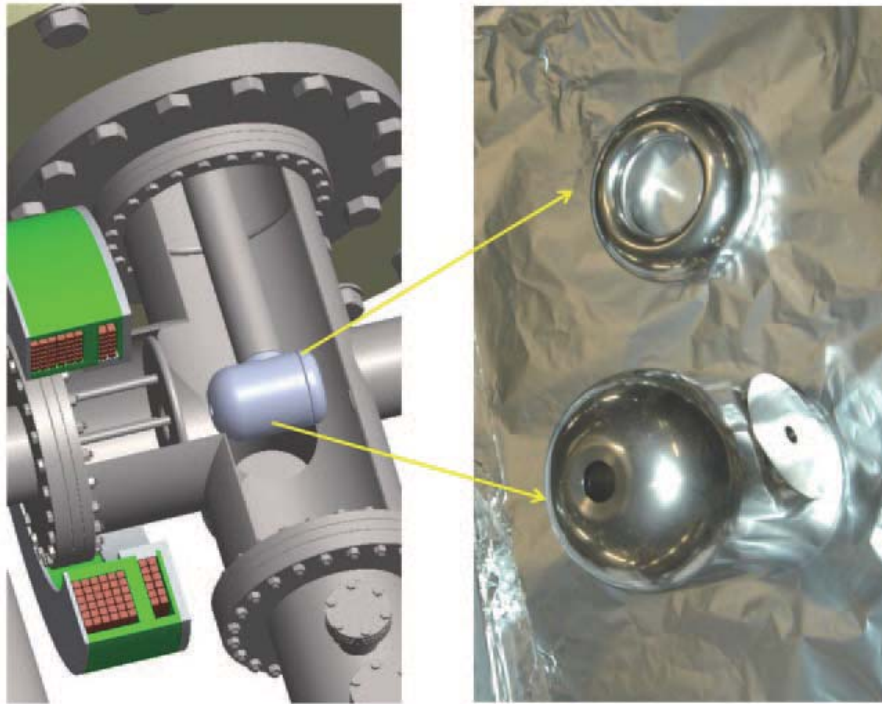
次に膜厚計を用いてアンチモンの蒸着実験を行った。④-図 19 に試験結果を示す。測定した膜厚の関数として 1 nm の蒸着に必要な時間及び真空度を示す。実験では、アンチモン加熱ヒーターの電源パワーを一定にしていたので、時間と共に真空度が悪くなり、それと共に蒸着時間が短くなるのがわかる。1 nm の蒸着時間と真空度の掛け算の値は、ほぼ一定であった。膜厚計実験により、アンチモンを 20 nm 蒸着するのに必要な条件を得ることが出来たので、シリコン基板にアンチモンを 20 nm 蒸着し、その後光電流をモニターしながらセシウムを蒸着し、Cs₃Sb の成膜を試みた。④-図 20 は波長 532 nm のレーザーの ON-OFF に対する応答を示したものである。125 μW のレーザーパワーに対して、得られたビーム電流が 0.2 μA であったことから、量子効率 QE = 0.37% が得られた。今年度の光カソード試作という目標は達成したものの、コーネル大学では Cs₃Sb カソードを用いて 4% 以上の QE を波長 520 nm レーザーに対して得ている。今後も、QE の一桁増を目標として、実験を続ける予定である。



④-図 20. 成膜した Cs₃Sb カソードにレーザーを照射し、測定した光電流(赤)と成膜装置の真空度(青)。0.2 μA の電流を得るために波長 532 nm のレーザーパワーが 125 μW であったことから、量子効率 (QE) 0.37% が得られた。

【カソード電極の製作】

成膜したカソードは、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は規格が異なるため、カソード電極の再設計を平成 25 年度に行った (④-図 21 左)。平成 26 年度はこのチタン製電極を製作した (④-図 21 右)。電極の形状も見直し、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設計になっている。



④-図 21. カソード電極の設計（左）と製作した電極（右）。材質は 2 種チタン。

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。株式会社リガク(以下、「(株)リガク」という。)は、国立大学法人東北大学・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 線の実験装置の製品化要素開発を目指している。また、同時に、(3) その技術が活用される潜在市場についての調査を進めることとしている。

平成 25 年度より、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てきた。平成 26 年度においては種々検討の結果、最終的に Photon Counting 型検出器を選定・調達し、その特性評価を行った。市場調査に関しては、応用分野として考えうる方向に沿って情報収集を進めた。

⑤-1 イメージングのための検出器の選定・評価

独立行政法人産業技術総合研究所の S バンド小型リニアック施設において生成される LCS-X 線を利用し、国立大学法人東北大学が設置した Talbot-Lau 干渉計で用いた位相イメージング予備試験に参加した。そこでは CCD カメラやイメージングプレートを用いて LCS-X 線によるモアレ像の取得に成功したが、ビジビリティが悪く鮮明な画像は得られなかった(詳細は⑧-1 および⑩-1 に記述)。原因は LCS-X 線の強度不足と共に、LCS-X 線よりも高エネルギーの X 線が被って検出されているためと推測された。従って、この高エネルギー X 線の分別の必要性を認識させるものであった。

イメージング実験に使われている検出器は、多くの場合、CMOS 検出器が使用されており、平成 25 年度においては、その方向に沿って CMOS 検出器を調達し、その性能評価を行った。しかし、平成 26 年度に実施した産業技術総合研究所での位相イメージング予備試験では、X 線エネルギーの分別が有用であることが示され、LCS-X 線イメージングに適した検出器の選定・評価に取り入れるべきと判断することになった。

CMOS 検出器の特性として、電荷蓄積型であるため X 線のエネルギー分別ができず、よって入射 X 線のエネルギー分別およびエネルギー測定ができない、また光量が十分でない場合にはバックグラウンドが相対的に高いなどの問題がある。そこで、平成 26 年度においては、エネルギー分別機能を持つことによって余計なバックグラウンドを除去して検出できる、Photon Counting 型検出器の調達を検討した。

まず、Photon Counting 型であり、且つ高エネルギー対応の検出素子を持つ CdTe 検出器の実

機貸し出しを受け、検出感度の直線性、安定性、画像評価などに関して評価を行った。その結果、(1) CdTe センサーの特性として現れる、ポラリゼーションという時間経過とともに素子が分極を起し感度が変化する現象、(2) 結晶性の問題で、画像のバックグラウンドが安定しない、および (3) 検出器のタイル間での感度のばらつきなどの問題が顕著であることが判明した。一方、CdTe センサーに比較して、高エネルギー対応では劣るが、シリコン (Si) のセンサーを持つ Photon Counting 型検出器は、今までの使用実績から上記の問題をクリアーしている。そこで、最終的に Si センサーを持つ Photon Counting 型検出器が本目的に適していると考え、検出器として (株) リガク製 HyPix3000 を採用することを決め調達した。CMOS 検出器および CdTe 検出器に比較した時の、HyPix3000 の性能および優位性を⑤-表 1 に示す。HyPix3000 の評価試験は、産業技術総合研究所での LCS-X 線による位相イメージング予備試験の際に、デモ機を用いて既に実施しており、また、東北大学における X 線管球による X 線格子の評価試験でも使われている (詳細は⑧-1 および⑩-1)。なお、平成 25 年度調達の CMOS 検出器は、今後 LCS-X 線の強度が上がり、Photon Counting での X 線の数え落としが発生する際に重要となること、また大面積と言う利点も生かすことができることから、本課題での技術開発で十分に役に立つものである。

⑤-表 1. CMOS 検出器および CdTe 検出器に比較した時の、HyPix3000 の性能および優位性

感度の直線性	Photon Counting 型検出器は、CMOS 検出器の様な電荷蓄積型検出器に比較して、大量の光子が入射した時に数え落としの問題が発生するが、HyPix3000 は、1M counts/second まで直線性がある。
安定性	結晶性が十分でないセンサーを持つ CdTe 検出器に比較して、HyPix3000 は結晶性の良い Si センサーを使用しているため、時間変化、バックグラウンドの変動などに問題はなく、安定した検出を行うことができる。
エネルギー分解能	Photon Counting 型検出器は、検出する X 線を目的とするエネルギーに絞ることができるエネルギー分別機能を持つため、その機能を持たない CMOS 検出器に比較してバックグラウンドが極めて低い。
画像	HyPix3000 は上記エネルギー分解能を持つことから、CMOS 検出器に比較して極めて高い画質を得ることができる。

なお、エネルギー分別機能をもつ HyPix3000 の採用は、本プロジェクトにおける基礎データの収集として、さらに以下の点を生かすことができる。

- エネルギーを弁別してイメージングすることができるため、画像を入射 X 線のエネルギー毎に画像化できる。
- 本プロジェクトで用いるコンプトン型の発生装置では、X 線ビームの発散角方向にエネルギーの分布が生じると考えられるが、これらのエネルギー分布を直接測定できる可能性がある。

- プロジェクトでは電子加速器からの高エネルギーのバックグラウンドが測定に影響することが懸念されているが、フォトンカウンティング型のエネルギー弁別の検出器であれば、バックグラウンドを除去してデータを取得することが可能である。

種々の評価が求められるイメージングの初期実験においては、当検出器は最適な検出器であると考えられ、基礎データ収集に貢献できると考えられる。これらのことから、平成 27 年度実施予定のイメージング実験において使用していく予定である。HyPix3000 の概観写真を⑤-図 1 に示す。また、Hybrid Pixel Detector HyPix3000 仕様を⑤-表 2 に示す。



⑤-図 1. HyPix3000 の外観

⑤-表 2. Hybrid Pixel Detector HyPix3000 仕様

検出方式	直接検出型 Photon Counting
検出面積	77.5 × 38.5 mm ²
ピクセルサイズ	100 × 100 mm ²
ピクセル数	298,375
エネルギー分解能	< 25% @8.02 KeV (CuK α radiation)
カウントレート (global)	>2.9 × 10 ¹¹ counts/second
カウントレート (local)	>1 × 10 ⁶ counts/sec/pixel
不感時間	3.7 m sec 0 m sec for zero dead time mode
サイズ	147 (W) × 93 (H) × 180 (L) mm ³
重量	約 2 kg

⑤-2 市場調査

小型高輝度 X 線源の技術が活用されうる潜在市場に関する調査を、分析装置メーカーとしての立場を生かして進めている。平成 26 年度は国際会議や展示会に参加した際に情報収集を進めると共に、(株)リガクの複数の顧客に期待する仕様の聞き取りを開始した。半導体業界メモリー分野の顧客からは、半導体上に形成されたナノメートルオーダーの構造の寸法を CD-SAX という手法で小角散乱の原理を用いて測定するが、現行の市販の X 線発生装置では X 線強度が足りないためインラインでの測定ができない状態であり、100 倍の X 線強度が得られる装置であれば十分に検討に値するということが示された。将来実現を目指す LCS による高輝度小型 X 線源が想定するレベルである。

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。実験室系 X 線発生装置としては、(株)リガクが販売する回転対陰極型の発生装置 FR-X が現在の最高輝度 (3 kW ϕ 70 μ m フォーカスサイズ) を実現しているが、第 3 世代の放射光施設で発生できる X 線に比較して、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 線源との間を生める、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 線発生装置が望まれている。潜在的な需要が十分に存在すると考えられる、分析、イメージング、半導体分野での主な利用を⑤-表 3 に示す。特にイメージングアプリケーションの中での位相コントラストイメージングが注目されており、今後は、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、高輝度小型 X 線発生装置としての仕様の作成を進める。

⑤-表 3. 高輝度小型 X 線発生装置で想定される主な利用

分析分野 (製薬、材料企業)	A) たんぱく質構造解析 B) 小角散乱
イメージング アプリケーション (医療、工業用非破壊検査企業)	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
半導体関係 (半導体製造企業)	A) EUV 露光装置としての光源 B) マスク検査用の光源 C) CD - SAX

⑥ クライオ光陰極高周波電子銃開発

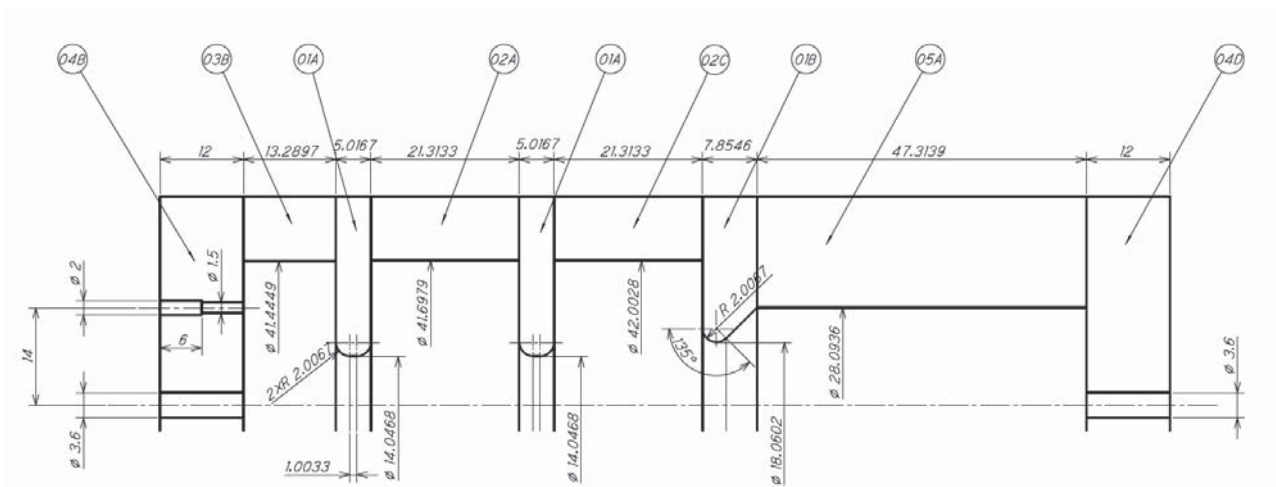
(再委託先：学校法人日本大学)

概 要

平成 25 年度に製作した、クライオ光陰極高周波電子銃用の基本同軸空洞構造から成る試験空洞について、室温において RF 特性測定を行った。完成した空洞は、概ね 2 次元電磁界計算コード SUPERFISH によるシミュレーション結果を再現することが確かめられた。さらに絶対温度 20 K まで冷却して RF 特性を測定し、高純度銅の冷却効果の確認を行った。その結果、20 K まで冷却した際の空洞の無負荷 Q 値、共振周波数変化とも、平成 25 年度に行った高純度銅材の冷却時特性の検討結果を良く再現することが確かめられた。この結果を元に、平成 26 年度には大電力 RF 入力に必要な入力カップラーを備えた低電力試験用空洞の設計計算を、SUPERFISH と 3 次元電磁界計算コード CST Studio を用いて進め、決定した空洞の構造・寸法に基づき KEK で超精密加工を行った。完成したカップラー付き試験空洞の室温における測定では、予定より 600 kHz 以上共振周波数が低かったが、Q 値と結合係数については概ね計算と一致する結果が得られた。しかし、軸上電界測定の結果、円筒空洞部分に非軸対称な電磁場の存在が無視できないことが示唆された。平成 27 年度には、冷却測定などさらに詳細な測定を行うとともに、カップラーの特性及び 2.6 セル空洞の特性について再検討を行う予定である。

⑥-1 基本構造の試験空洞の室温における RF 特性

絶対温度 20 K において常伝導かつ高効率で動作する、光陰極高周波電子銃開発のため、平成 25 年度には高純度 6N8 銅材(残留抵抗比 RRR3000 以上)による冷却空洞の基本的特性を調べた。この目的のために、基本的な 2.6 セルの加速空洞と同軸結合カップラー用外壁から成る、円筒軸対称の試験空洞を製作し、低電力 RF 試験を行った。平成 26 年度には、KEK で拡散接合により完成した空洞について、室温及び 20 K まで冷却する間の詳細な RF 特性の変化を測定した。結果は以下の通りである。



⑥-図 1. 試験用空洞の設計断面図。寸法は全て超精密加工を行った 23.5°C での寸法。

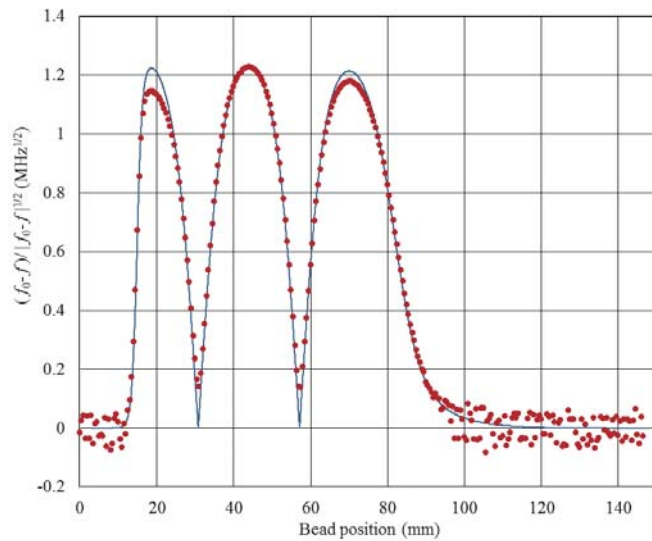
拡散接合で組み上げた空洞の構造を⑥-図1に示す。摂動法による空洞中心軸上の電界分布測定のために図中の空洞両端の端板には直径 3.6 mm の穴が、また左端の端板の中心軸から 14 mm の対称な 2ヶ所にアンテナ挿入用の穴が設けてある。この構造について拡散接合前に行った RF 特性の測定では、23.5℃真空中に換算して π モードの共振周波数が 5692.47 MHz であった。拡散接合後の測定では 5692.60 MHz となり 130 kHz 上昇した。また空洞の無負荷 Q 値は約 9000 から 11465 に上昇した。ただしこの測定では、較正されていない温度計を使用しており、周波数の絶対値には 100 kHz/℃の温度依存性による数 10 kHz 程度の誤差を含む。一方、設計時の SUPERFISH による計算ではそれぞれ、共振周波数 5692.97 MHz、無負荷 Q 値 11400 であった。したがって、共振周波数については計算より 300 kHz 以上低い、Q 値は概ね計算通りの結果が得られた。

電界分布測定は、各パーツの加工が終了した時点でそれらの特性を確認する目的で予備的な測定を既に行っていた。しかし、データの取得を手動で行っていたため 1 回の測定に数時間を要し、この間に環境の温度・湿度変化の影響を受けていた。その後、PC による自動測定プログラムを作成したので、拡散接合前の共振周波数を再確認する実験に合わせて改めて測定を行った。

ビーズを用いた摂動法による軸上電界分布の測定時の写真とその測定結果を⑥-図2に示す。グラフの縦軸は、測定された摂動による周波数変化の平方根をとり、電界の振幅を正にとっている。測定には摂動用ビーズとして直径 2 mm の金属球を用い、ノート PC からステッピングモーターの自動制御を行い 0.5 mm 間隔で移動させた。ビーズが停止した各点においてネットワークアナライザで得られる S パラメータの電圧反射係数 (S_{11}) の周波数分布から、空洞による RF の共鳴吸収のピークを自動ピークサーチで追尾し、ビーズによる摂動で変化するピーク周波数を、気温・空洞温度・湿度・気圧とともにノート PC に自動取得した。1 回の測定に要する時間は、⑥-図2の場合で約 12 分となり、手動でデータを取得していた場合の 1/10 以下であった。この短時間での気温等の変化は小さいため、繰り返し測定を行って平均化を行えば、その影響は線形な周波数変動として近似できる。このため、この短時間の測定を連続して 10 回行って平均化を行い、周囲環境の影響は、測定範囲の最初と最後の電磁界の存在しない位置で周波数が一致するよう線形補正を行い、これにより環境の影響を取り除いた。⑥-図2の中の実線は、SUPERFISH による計算で求めた軸上電界とビーズの寸法から、摂動量を計算した結果である。これらからシャントインピーダンス r と無負荷 Q 値 Q_0 の比 r/Q_0 を導出することができ、SUPERFISH による計算値 376 Ω に対し測定値が 365 Ω 、と良く一致する結果が得られた。これから、室温では空洞が概ね設計通りの RF 特性を持つことが示された。



(a)



(b)

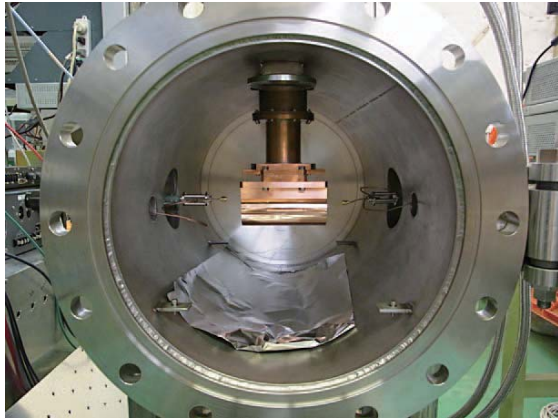
⑥-図2. 平成25年度に引き続き、試作空洞の拡散接合前に行った、摂動法による軸上電界分布測定準備中の写真 (a) と測定結果のグラフ (b)。グラフの縦軸は、摂動による周波数変化の平方根 $((f_0 - f) / |f_0 - f|^{1/2})$ 、ただし f_0 : 摂動なし、 f : 各位置での周波数) をとっている。実線は SUPERFISH による計算。

⑥-2 基本構造の試験空洞冷却による RF 特性測定結果

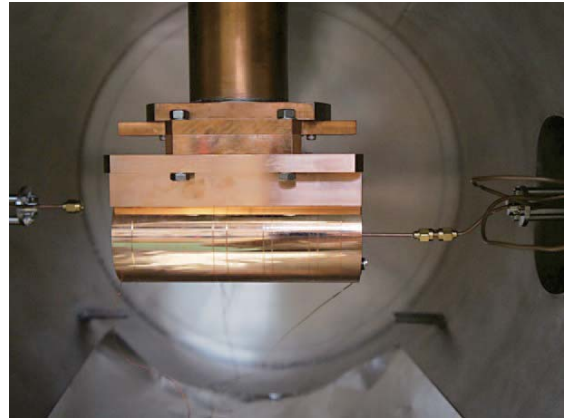
空洞を 20 K まで冷却する実験は KEK のクライオスタットを用いて行った。クライオスタットとそこに設置した空洞の様子を⑥-図3に示す。空洞の向きは⑥-図1とは左右が反転しており、右端板中心の穴にアンテナを挿入して RF を入力している。冷却試験における空洞温度の測定は、KEK の較正済み半導体温度センサーを使用した。そこで、クライオスタット内を真空に引き、実際に真空中における π モード共振周波数を測定したところ、23.5°C 換算で 5692.67 MHz となり、以前の未較正の温度計を使用した実験結果と比べ 70 kHz 高い結果が得られた。この値は較正された温度計によるため、23.5°C での空洞の共振周波数としてこの値を最終的に採用することにした。

冷却実験では、空洞を冷却している間の空洞温度、 π モード共振周波数、共振周波数周辺の S_{11} 分布を 5 秒間隔でノート PC に取り込んだ。その結果得られた、空洞の温度と π モード共振周波数の変化を⑥-図4に示す。⑥-図4 (a) に見られる通り、冷却開始から約 150 分後には空洞温度が 23 K まで低下し、共振周波数は一定値に近づいた。共振周波数が一定になることは、この温度以下では無酸素銅の収縮が 10^{-6} 以下となる、米国標準技術研究所 (NIST) の線膨張率の計算式による結果と一致する。この実験では最終的に空洞温度が 21.27 K に低下するまで測定を行ったが、20 K でも共振周波数はほとんど変わらない。

21.27 K での共振周波数は 5711.76 MHz となった。この温度に至るまでの共振周波数の温度依存性を、NIST の計算式に基づく結果と比較するため⑥-図4 (b) に示す。80 K 以下では NIST のデータから推測された周波数変化と比較し易いよう、拡大したグラフも示す。23.5°C 真空中において 5692.67 MHz であった共振周波数は、NIST の計算式に基づけば 21 K では約 5711.57 MHz になると推定される。したがって実験結果は約 190 kHz 高い周波数を示している。

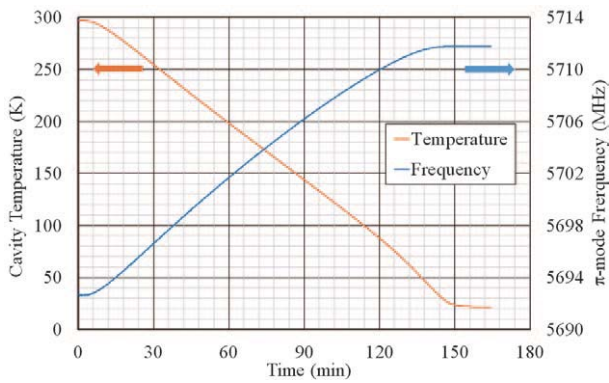


(a)

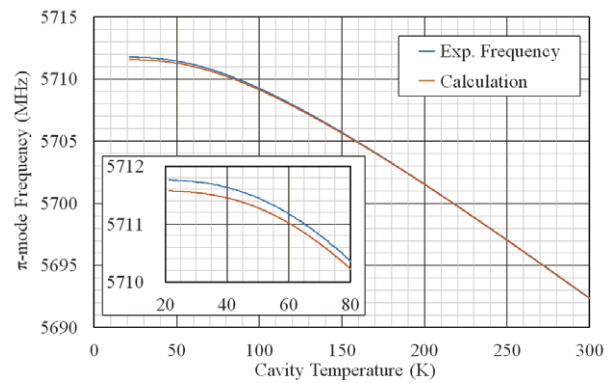


(b)

⑥-図3. 20 K 冷却実験に使用したクライオスタットの写真（左）と、設置した試験空洞の写真。



(a)

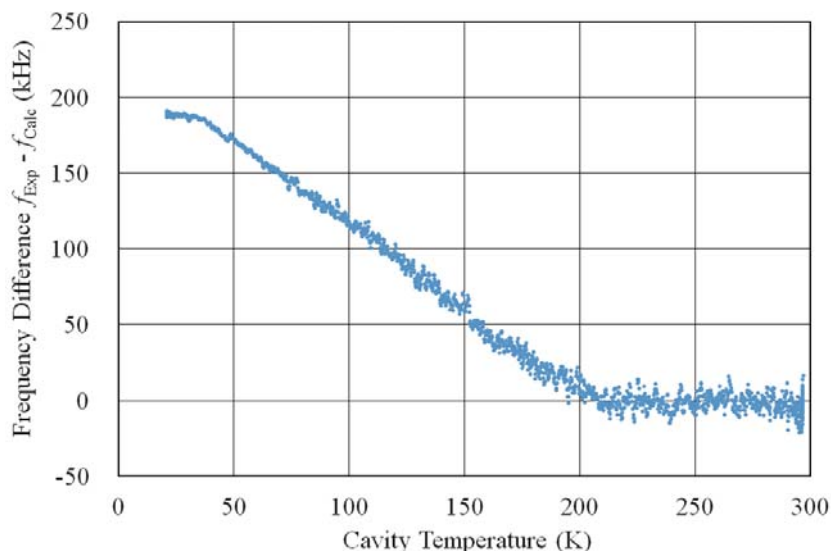


(b)

⑥-図4. 冷却実験によって得られた、クライオスタット中の空洞温度と π モード共振周波数の時間変化(a)、及び空洞温度に対する共振周波数の変化 (b)。

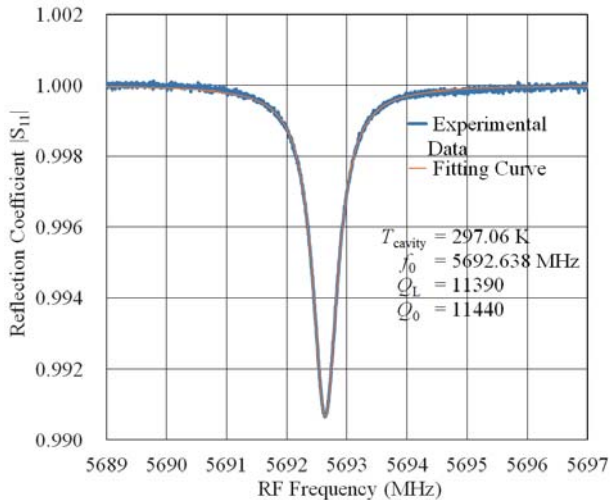
共振周波数の実測値と NIST の計算式の結果の差について、23.5°Cでの周波数を基準にその温度依存性を⑥-図5に示す。図から、210 K 以上では良く一致しているが、温度の低下に対し概ね直線的に周波数の差が拡大しており、40 K 付近以下では差が約 190 kHz の一定値に近づいていることが分かる。このような差が生じた原因について、一つは周波数変化の推定に用いた NIST の計算式における銅の線膨張率の精度が十分ではない可能性が考えられる。一方、この空洞設計に当たり使用した SUPERFISH による共振周波数の計算では、空洞寸法のみで周波数が一意的に決定したのに対し、後に述べる平成 26 年度に試作したカップラー付き試験空洞設計において、CST Studio を使った計算ではそうはならないことが分かった。CST Studio による空洞の電磁界シミュレーションにおいては、空洞表面抵抗により共振周波数が異なる。通常の室温における無酸素銅の表面抵抗値として 0.01955 Ω を使用した場合と、20 K における異常表皮効果の理論に基づく表面抵抗値 0.003541 Ω を使用した場合を比較すると、室温で 5692 MHz 付近の共振周波数の円筒構造のみから成る空洞では、20 K に相当する表面抵抗の小さい場合に約

200 kHz 周波数が高い計算結果が得られている。このとき空洞の Q 値の比は表面抵抗の比の逆数となり、20 K では Q 値が 5.52 倍に増加することが期待される。したがって、空洞の損失の減少が計算上の周波数上昇に寄与している可能性があるが、⑥-図 5 の実験的に得られた周波数と線膨張率の計算式による周波数との差と表面抵抗の違いとの相関については、CST Studio による計算も含めさらに詳細な検討が必要である。

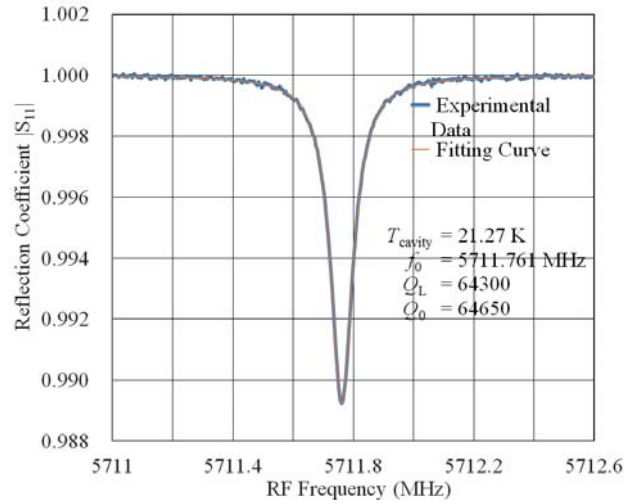


⑥-図 5. 23.5°C を基準に、空洞冷却の過程で求めた π モード共振周波数の実験値と線膨張率から求めた推定値の差。

⑥-図 6 に、クライオスタット内の真空中に設置された空洞について、冷却実験中に測定した S_{11} の分布のうち、室温と 21.27 K での結果と、それらから求めた無負荷 Q 値を示す。297.06 K では共振周波数 5692.638 MHz、無負荷 Q 値が 11440 であったが、21.27 K では 5711.761 MHz、無負荷 Q 値が 64650 と、5.65 倍に増加した。

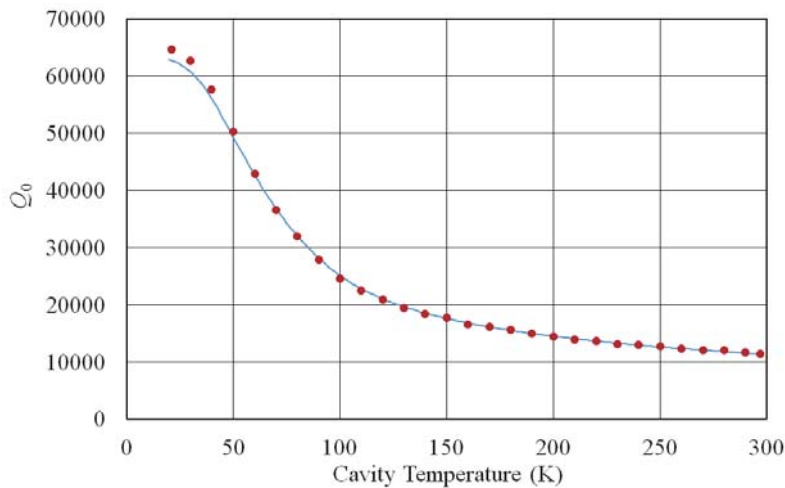


(a)



(b)

⑥-図6. ネットワークアナライザによる S_{11} 分布測定から室温における共振周波数と Q 値を求めた結果 (a) と、21.27 K まで冷却して得られた共振周波数と Q 値の結果 (b)。実線はそれぞれ、共鳴スペクトル関数のパラメータを実験結果に合わせたときの曲線。



⑥-図7. 冷却実験で求めた、空洞温度による無負荷 Q 値の変化と、異常表皮効果による表面抵抗計算値の温度変化から求めた Q 値 (曲線) との比較。計算は RRR3000 銅材を仮定している。

空洞の冷却によって銅の表面抵抗が低下し、これに従い空洞の Q 値が増大する様子を、約 10 K ごとに解析して求めた無負荷 Q 値について⑥-図7に示す。実線は異常表皮効果を考慮した表面抵抗値に基づく Q 値の計算値である。この結果を見ると、50 K 付近までは異常表皮効果による表面抵抗値に基づく Q 値が実験結果を良く再現していることが分かる。またさらに低温の領域では、数%であるが実験結果のほうが高い Q 値を示している。拡散接合により空洞を製作すると、接合部分に合金を作らないため低温時に銅材料の特性劣化への影響が小さく、Q 値に関しては、ほぼ計算通りの特性が期待できると言える。

以上の、基本構造から成る空洞の冷却時 RF 特性の測定結果を、⑥-表1にまとめた。ここで、*を付してある 21 K における共振周波数の計算値は、23.5°C で得られた実験値から線膨張率に

より推定した値である。なお、NIST の無酸素銅の線膨張係数に関する計算式に基づく 23.5℃と 20 K の寸法比は、周波数を 10 kHz 単位以下まで指定可能な桁数まで採用すると、 $[23.5^\circ\text{C}] / [20\text{ K}] = 1.0033203$ である。これに対し、実験的に得られた共振周波数の比は $[23.5^\circ\text{C}] / [21.27\text{ K}] = 1.0033534 (\pm 12)$ となる。ただし、1 kHz の桁の実験数値は誤差を数 kHz 含むと考え 10 kHz の桁までを信頼できる数値としているため、この実験値の最小桁の数値に対し概略として最大 ± 12 程度の誤差が見込まれる。

⑥-表 1. 基本構造空洞の冷却試験結果

	実験値	計算値	
共振周波数 (23.5℃)	5692.67	5692.97	MHz
共振周波数 (21 K)	5711.76	*5711.57	MHz
無負荷 Q 値 (23.5℃)	11465	11400	
無負荷 Q 値 (21 K)	64650	62920	
r/Q_0	365	376	Ω

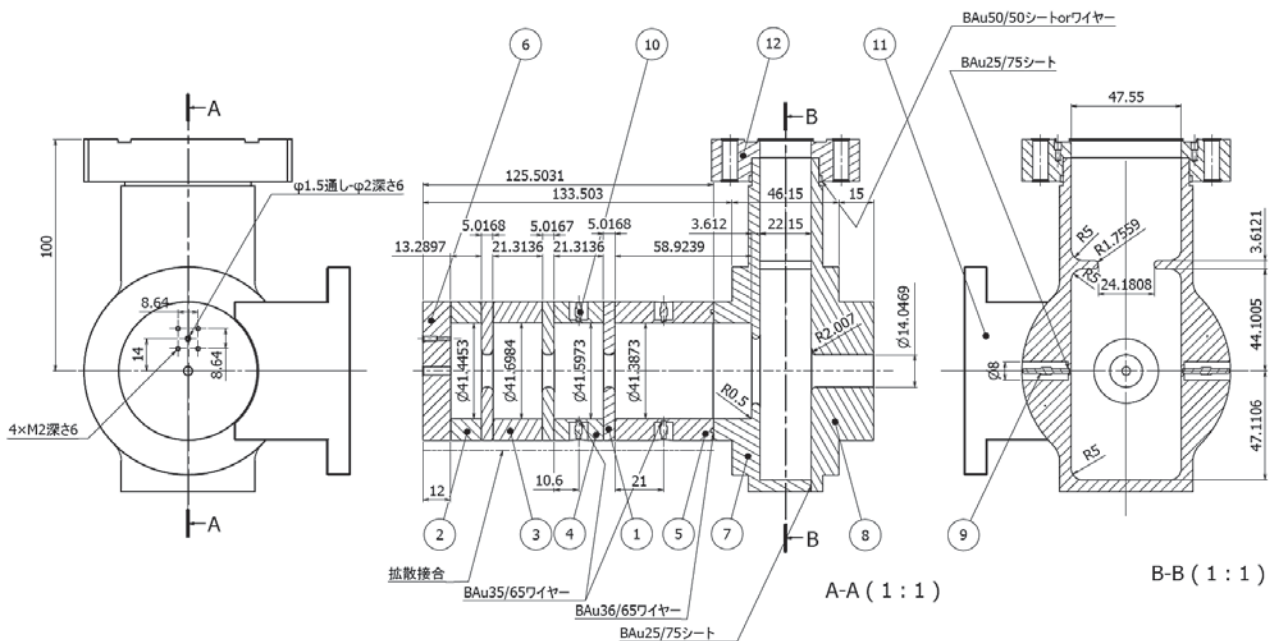
⑥-3 カプラー付き試験空洞の設計

最初の基本構造空洞における実験結果から、平成 26 年度においては、大電力 RF 入力空洞を製作するための試作空洞として、RF 入力カプラー付きの低電力試験空洞を製作した。20 K に冷却した際に 5712 MHz の共振周波数となるよう、室温での空洞寸法を決定するに当たり、寸法比として、 $[23.5^\circ\text{C}] / [20\text{ K}] = 1.0033529$ を採用した。この数値は、試験空洞の冷却実験で実際に得られた共振周波数変化を kHz 単位まで評価し、その変化量を全て空洞寸法の変化によると仮定して得た。

高周波加速管の RF 入力カプラーについては、1) 加速セルの一つのシリンダー部外周に RF 結合用穴を設け、矩形導波管を直接接続する方法、2) 加速管端部のセルの隣に短い同軸構造のモード変換器を設け、軸外の矩形導波管モードから軸上円筒モードに伝送モードを変換し加速セルに結合する方法、3) 2) の同軸構造を長くすることで外側にビーム集束コイルを設置可能にする方法、などがある。このうち 1) は、結合セルに生じる電磁界を軸対称にする工夫が必要で、複雑な構造を検討しなければならない。特に、RF 電子銃は加速セル数が少なく、非軸対称な高い電磁界はビームに大きな影響を及ぼす。2) または 3) の方法は、非軸対称な電磁界の発生を避けることができる点で有利であるが、2) はモード変換部分の電磁界強度が高く、放電が発生しやすい問題がある。3) の場合は集束コイルを設置できる点では、RF 電子銃用カプラーとしては有利になる。しかし、3) の構造を 20 K 冷却空洞に採用するには、長い同軸構造の内部導体冷却効率の問題がある。平成 25 年度の試験空洞の構造には、同軸カプラーを検討する前提で、2.6 セル加速構造の最後のセルの下流には同軸カプラーの外壁に相当する構造を作り、内部導体無しの RF 遮断領域としてあった。しかし、内部導体冷却の問題から、同軸カプラーは

低温冷却空洞に採用せず、この代わりに、Xバンド加速管の入力カップラーとして採用されたことのある、長い円筒空洞と矩形導波管から伝送モードを変換するモード変換器から成るカップラーを採用することになった。

設計したカップラー付き試験空洞の断面図を⑥-図8に示す。図中の寸法は全て、超精密加工を行った室温 23.5℃での値で、空洞の重要な寸法については 0.1 ミクロンまで指定した。実機において電子銃カソードを取り付けることになる、0.6 セルの端板部分については、平成 25 年度の試験空洞と同様に、直径 3.6 mm の軸上電磁界分布測定用の穴を設けることとした。この構造では、穴の影響で共振周波数がずれるため、0.6 セルのシリンダー径を調整してある。カソードを取り付けた場合の共振周波数については、穴なし端板に変更したときのシリンダー径を基に、別途空洞を製作し実験的に調べる必要がある。平成 26 年度では、カップラーの特性を調べるための空洞試作のみを行い、当初検討を予定していた、カソード取付部の構造に関する具体的な検討は行わなかった。

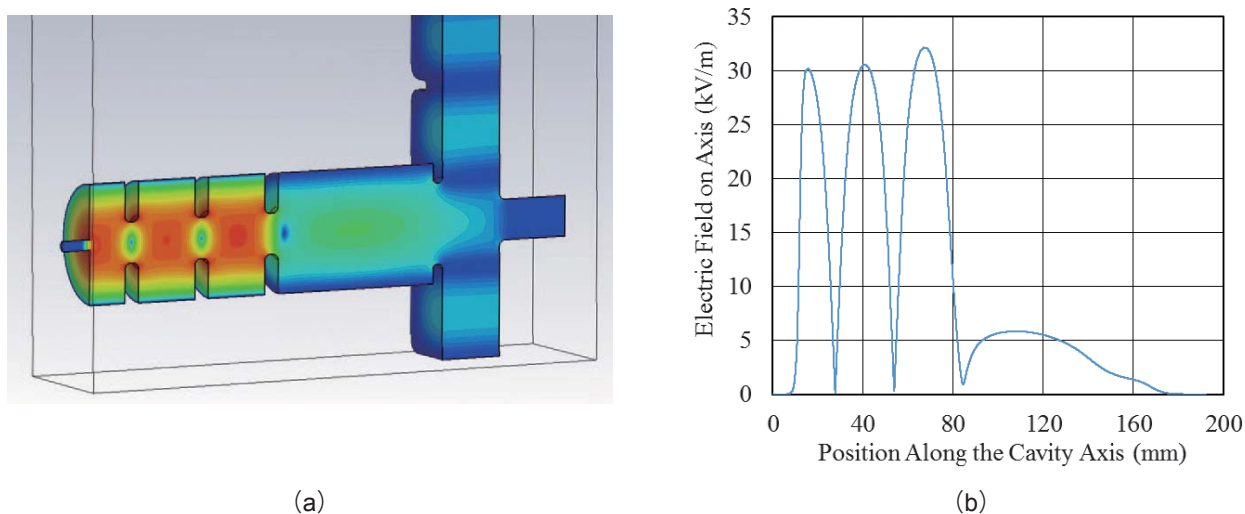


⑥-図 8. カップラー付き試験空洞の設計断面図。

この試験空洞では長い円筒空洞がモード変換器に接続する形になるため、円筒空洞とモード変換器内に生じる電磁界は、加速セル内の電磁界に比べ低く抑えることができる。カップラー付き空洞の設計に当たり、最初に SUPERFISH により、2.6 セル加速構造と 5712 MHz RF の自由空間波長 λ_0 の 1.25 倍長の円筒導波管を直列に配した空洞について、寸法の最適化を行った。円筒導波管とモード変換器の間は実際には結合穴が同軸状にあるが、単に端板で短絡する条件で計算を行った。SUPERFISH によるこの部分の計算では、円筒導波管の内径は、最後の加速セルのシリンダー内径と同一に設定した。

カプラー部分の構造決定は以下の流れで行った。カプラー部は同軸構造ではないため、電磁界シミュレーションには3次元計算コードである CST Studio を用いた。まず、矩形導波管の TE_{10} 伝送モードから円筒導波管の TM_{01} モードに変換する構造は、矩形導波管の先端から $3/2\lambda_g$ (λ_g は矩形導波管の 5712 MHz における管内波長) 付近に矩形絞りを設け、定在波を発生させて円筒導波管との間の円形絞りの位置で軸対称に近い電場分布が得られるよう、CST Studio による計算から、絞りの位置と矩形導波管の長さを調整した。これには、CST Studio で得られた電場の挙動についてのアニメーションを利用した。なお、矩形導波管の規格は WRJ5 を採用し、常温における断面の内寸は 47.55 mm × 22.15 mm である。

矩形導波管から円筒導波管への RF 伝送は、加速空洞セルがない条件で進行波の透過率を調べることにした。ここで、CST Studio を用いて 5712 MHz の入力 RF 反射率が小さくなるよう、矩形導波管内の絞りの位置と開口幅、円筒導波管の絞り径、円筒導波管の内径、を最適化した。これにより、5712 MHz では矩形導波管から見た入力 RF の電圧定在波比 (VSWR) が 1.03 に調整された。さらにこれらの寸法を元に、2.6 セル加速空洞を円筒導波管に接続した条件で、空洞全体の共振周波数が 5712 MHz、導波管と空洞の結合係数 β が約 20 になるよう、円筒導波管端部の絞り径で主に結合係数の調整、2.6 セル加速空洞のうち最後の 1 セルのシリンダー径で共振周波数の調整を、CST Studio によるシミュレーションを繰り返して行った。

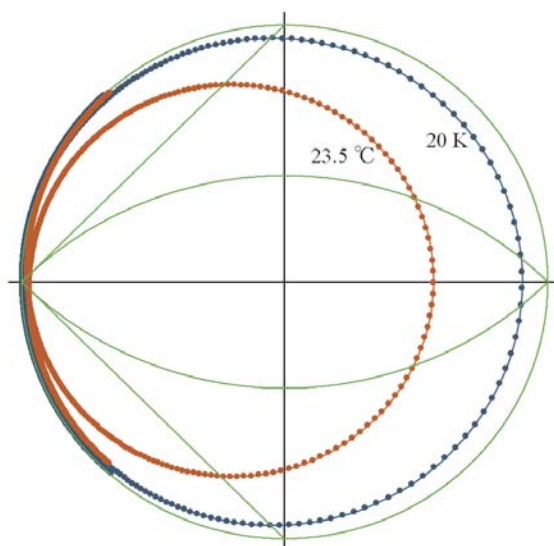


⑥-図9. CST Studio による、カプラー付き RF 電子銃用空洞シミュレーション結果。(a) 電場の 3D 分布図、(b) RF 入力 1 W における軸上電場振幅の分布。

シミュレーションによる寸法最適化を行い、5712 MHz の RF を 20 K に冷却した空洞に入力したときに得られる空洞内電界分布の計算結果を⑥-図9に示す。⑥-図9 (b) の縦軸は矩形導波管に 1 W の RF を入力したときの空洞軸上における電場の振幅を表す。計算を進める中で、円筒導波管部分の長さが $1.25\lambda_0$ では円筒 TE_{112} モードが加速 π モードに近い周波数で共振することがシミュレーションから分かり、安全のために TE_{112} モードの共振周波数が 100 MHz 程度高くなるよう、2.5 mm 縮めた。

実際にこの試験空洞を製作する際には、部品の接合過程において変形を生じる危険性から、拡散接合によって組むことができるのは円筒構造部分に限られた。また、カップラー部分は構造が大きくなることから、カップラーの矩形導波管部とモード変換器部を高純度 6N8 銅材で製作せずに通常使用する無酸素銅で製作することにした。このために、カップラーの円筒空洞を途中で分割し、2.6 セル空洞と円筒空洞の約 2/3 までの部分を 6N8 で製作し拡散接合で組み立てることとし、ロー付けで組み立てたカップラー部との間をロー付けで仕上げる方法を採用した。CST Studio による計算では、円筒空洞の途中で表面抵抗の異なる材料に変えた場合でも、カップラー部分は加速空洞部に比べて電磁場が弱いため、ほとんど RF 特性に変化がないことが確かめられている。

π モードの共振周波数付近について CST Studio で求めた、スミスチャートを⑥-図 10 に示す。同じ空洞寸法のままで、空洞表面抵抗を全て室温での値に設定した場合と、全て 20 K での値に設定した場合について、計算による RF 特性の違いを⑥-表 2 に示す。ただし、実際の室温 23.5°C 真空中における設計周波数は、5692.91 MHz である。



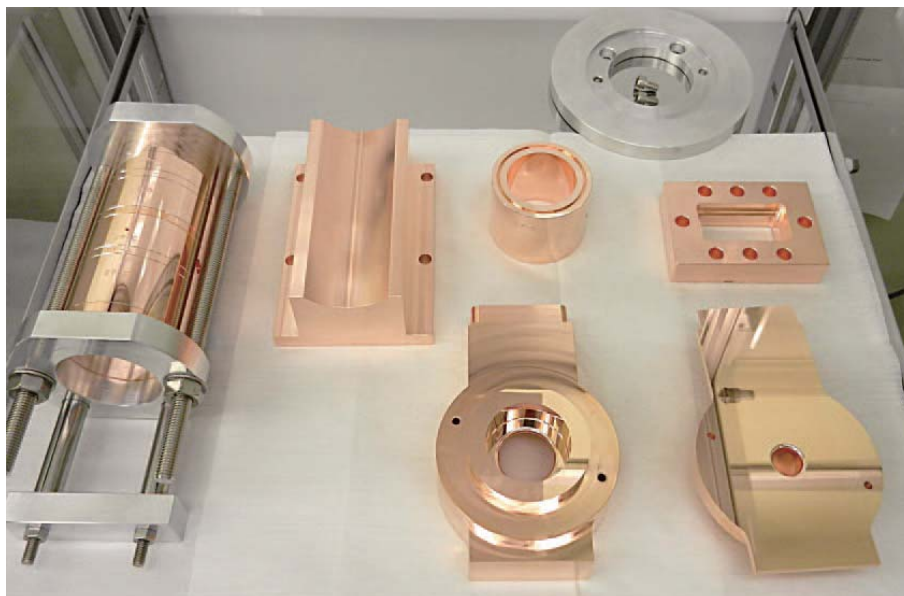
⑥-図 10. CST Studio による、空洞温度 23.5°C と 20 K に対応する空洞表面抵抗での S_{11} 計算結果を比較した、 π モード共振周波数 5712 MHz 付近のスミスチャート。

⑥-表 2. CST Studio で計算したカップラー付き空洞の 5712 MHz における RF 特性の、表面抵抗の違いによる比較。

空洞温度	23.5°C	20 K	
表面抵抗	0.01955	0.003541	Ω
π モード共振周波数	5711.91	5712.00	MHz
導波管結合係数	3.61	19.85	
無負荷 Q 値	11500	64600	
負荷 Q 値	2500	3100	
RF 電界立上り時間	139	172	ns

⑥-4 カプラー付き試験空洞の製作と特性測定

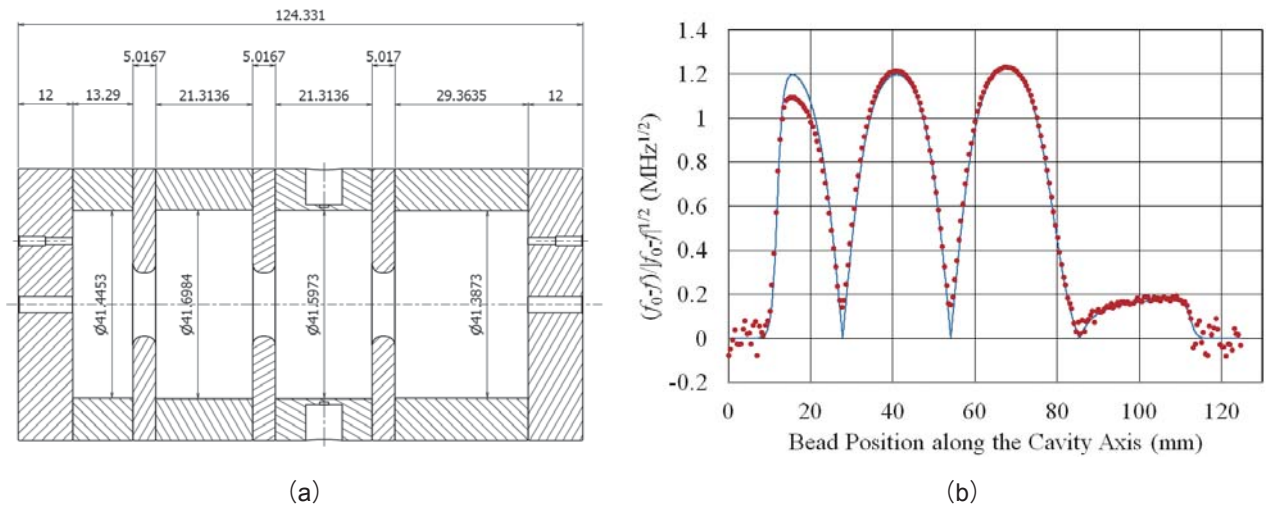
KEKにおいて超精密加工を行った空洞部品の写真を⑥-図 11 に示す。手前右側の二つの部品が矩形導波管とモード変換器部分を構成する。2.6 セル加速空洞部は、写真では RF 特性試験のために左端の治具で組んだ状態になっている。拡散接合に先立ち、⑥-図 12 (a) に示すように、円筒導波管による空洞部分の長さを 1/2 にした部品及び端板と 2.6 セル空洞を治具で組み、2.6 セル加速空洞 + 1/2 円筒空洞の組合せについて、確認のため室温大気中で RF 特性を測定した。この場合、構造が軸対称であるため、SUPERFISH と CST Studio の両方でシミュレーションを行った。⑥-図 12 (b) は軸上電界測定結果を SUPERFISH の計算（実線）と比較してある。この空洞構成では、右端が短絡されており、カプラー付き空洞と完全には対応しないが、ビーム加速軸上の電界が概ね計算通りに出来ていることを示す結果が得られた。拡散接合されていない状態のため、共振周波数の比較は正確ではないが、23.5℃真空中に換算したとき、測定では 5692.38 MHz となり、CST Studio の計算結果 5692.47 MHz と良く一致したが、SUPERFISH の計算では 700 kHz 高い 5693.08 MHz が得られた。平成 25 年度製作の試験空洞についても CST Studio で計算を行い、比較を試みる予定である。



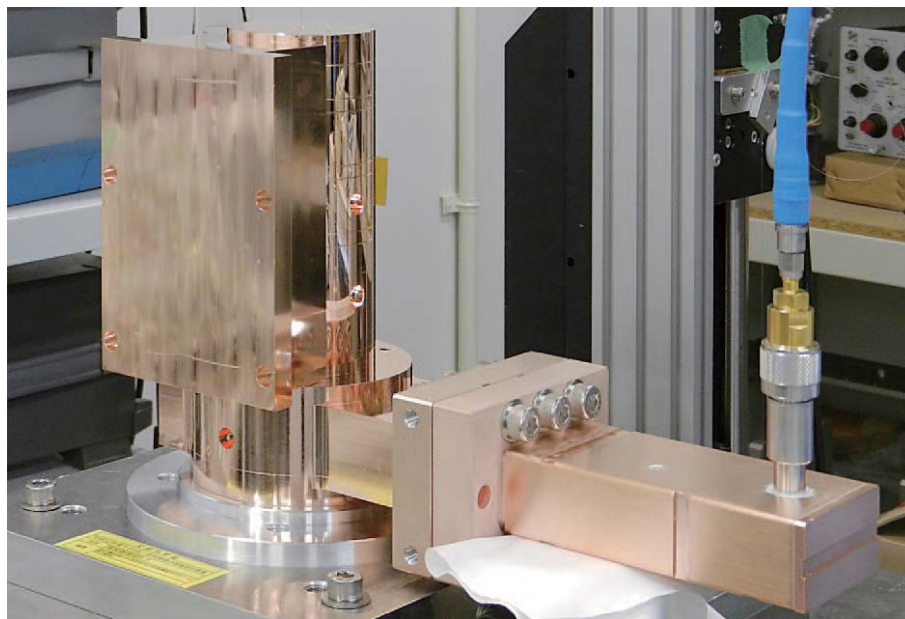
⑥-図 11. 超精密加工後のカプラー付き空洞の部品。2.6 セル空洞は左端の治具で組んである。

なお、⑥-2 で既に述べたが、CST Studio による計算において、⑥-図 12 (a) の寸法を変更せずに、銅の表面抵抗を 20 K に冷却したときの値に設定して計算すると、共振周波数は約 200 kHz 上昇し 5692.67 MHz となった。これは平成 25 年度の試験空洞において、NIST の線膨張率計算式から、23.5℃から 20 K への温度変化により幾何学的原因で生じると推測した共振周波数変化よりも、実際には約 190 kHz 高い結果が得られた事実と良く一致する。しかし、⑥-表 2 に示したように、カプラー付き空洞全体についての同様な計算結果の比較では、20 K で 90 kHz の上昇となっている。NIST の計算式に基づく銅の収縮係数の正確さについて議論するにはデータ不足であり、

さらに詳細な計算と空洞の試作・試験例の蓄積による比較が必要であるが、共振周波数については平成 26 年度の試験空洞で一部のセルに設けたチューナー構造を利用し調整することが可能である。完成したカップラー付き空洞については周波数調整の試験を予定している。



⑥-図 12. 円筒構造部分の RF 特性試験用組合せ断面図 (a) とその軸上電界測定結果 (b)。

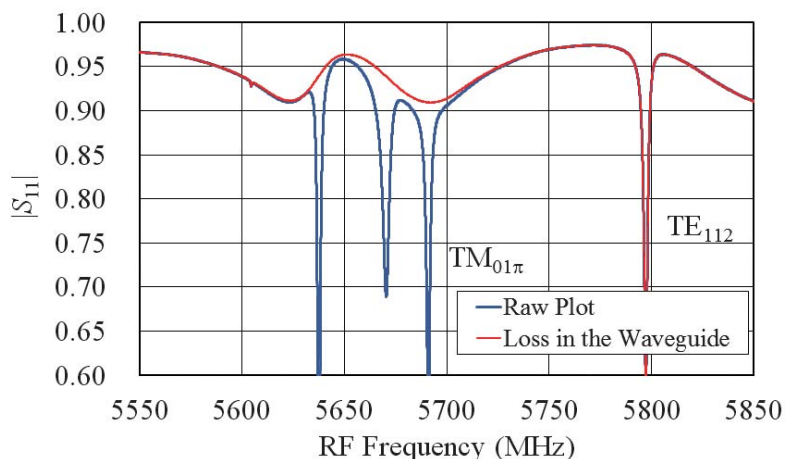


⑥-図 13. カップラー付き空洞の試験の様子。

以下で、拡散接合とロー付けにより完成した⑥-図 8 のカップラー付き空洞について、室温で行った予備的な RF 特性測定結果について述べる。

⑥-図 13 に RF 特性測定時のカップラー付き空洞設置の様子を示す。軸上電界分布測定のために、空洞の中心軸が鉛直方向になるよう設置されている。ネットワークアナライザーから出力され

た RF は、写真右側の同軸ケーブルから真空仕様の N 型同軸コネクタと同軸導波管変換器を通して矩形導波管に入力する。ネットワークアナライザとケーブルの較正は、N 型コネクタ手前の位置に較正キットを取り付けて行った。その結果得られた、導波管及び空洞に対する電圧反射係数 S_{11} の分布を⑥-図 14 に示す。図中の青い曲線は、空洞全体に対する S_{11} の測定結果を表す。2.6 セル空洞には TM_{01} の 0、 $\pi/2$ 、 π モードの共鳴があり、図中のそれぞれ 5638、5670、5690 MHz 付近のピークが対応している。円筒導波管部分は、内径から TE_{11} モードと TM_{01} モードの遮断周波数がそれぞれ 4260 MHz、5564 MHz で、他のモードはこの測定範囲には共鳴が存在しない。測定では、5800 MHz 付近に TM_{01} モードに属さない共鳴が観測されている。これは TE_{112} 共鳴であることが、電界分布の測定と計算から確かめられた。円筒導波管部分は、2.6 セル空洞及び矩形導波管と結合する穴がそれぞれ開いているため、幾何学的には円筒導波管の長さを決定できなかったが、 TE_{112} 共振周波数から実効長を求めると 75.5 mm で、結合穴壁厚の中心間距離に比べ約 12 mm 長い値となった。



⑥-図 14. 周波数 5550 ~ 5850 MHz の範囲の $|S_{11}|$ 測定結果。青色の曲線は空洞全体に対する $|S_{11}|$ 。赤色の曲線は 2.6 セル空洞部分に銅パイプを挿入し離調して得た、円筒導波管までの部分に対する $|S_{11}|$ 。

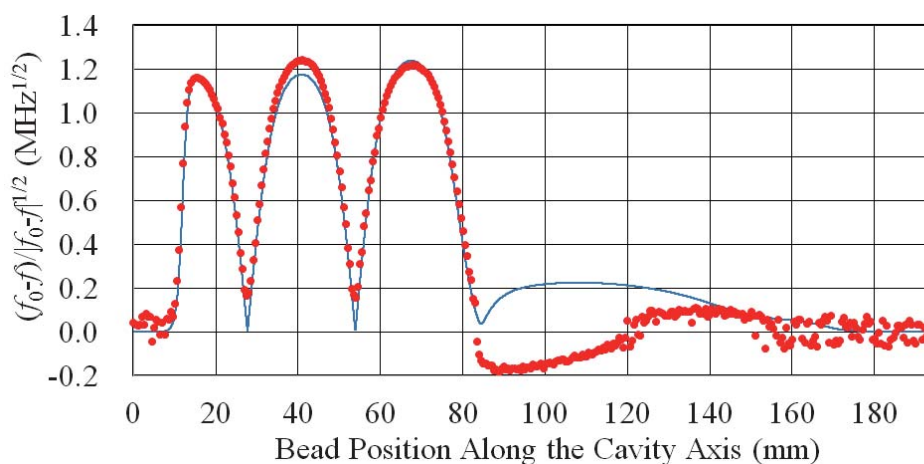
一方、⑥-図 14 の赤い曲線は、2.6 セル部分に細い銅パイプを挿入して空洞を離調して TM_{01} モードの共振が起きない状態で測定した S_{11} を表す。0.6 セルの端板にアンテナを挿入して測定した S_{21} の結果では、 TM_{01} の共振ピークしか検出されなかったことから、赤の曲線には円筒導波管部分までの TE_{112} 共鳴とその他の損失が観測されていると判断された。しかし、CST Studio による同じ周波数範囲に対する計算結果には、観測されたような広い周波数範囲に渡る損失は見られなかった。したがって、この損失はネットワークアナライザの較正方法に問題がある可能性を示唆している。導波管フランジ部分で簡易的な較正を試した結果では、赤い曲線のような損失は大きく軽減されていたことから、今後さらに精密な測定を行い、損失に関する振る舞いを確認する予定である。

これまでにカプラー付き空洞について測定した結果では、23.5℃真空中に換算した π モード共振周波数は、5692.27 MHz である。CST Studio の計算から 20 K で 5712 MHz を与える寸法を

決定し、室温寸法に換算した場合、⑥-3 で決めた換算係数 1.0033529 を用いると 5692.91 MHz である。したがって、600 kHz 以上の誤差がある。

また、ネットワークアナライザの較正の問題で誤差が大きい可能性があるが、導波管との結合係数を⑥-図 14 の共鳴ピークの反射係数から求めると、 $\beta = 3.48$ であった。また、0.6 セル端面に挿入したアンテナで測定した S_{21} から共鳴の半値幅を求め、Q 値を計算すると、負荷 Q 値が 2440 となり、これより無負荷 Q 値が 10930 となった。これらの結果は、概ね CST Studio の設計計算で得た⑥-表 2 の値と一致している。測定により得られた無負荷 Q 値から、23.5°C における空洞内 RF 電界の立ち上がり時間を求めると 136 ns となった。外部 Q 値が変化せず、21 K まで冷却した際に同軸構造のみから成る試作空洞の結果と同様に無負荷 Q 値が 5.65 倍まで増大すると仮定した場合、21 K では無負荷 Q 値、負荷 Q 値はそれぞれ約 61750、及び 2990 となり、RF 電界立ち上がり時間は 167 ns となることが期待できる。

さらに、軸上電界分布の測定結果を⑥-図 15 に示す。図中の実線は CST Studio による電場振幅の計算結果で、0.6 セル中のピーク値に規格化してある。2.6 セル空洞部分は特に問題ない結果が得られたが、円筒導波管部分では、軸上に磁界が生じていることを示唆する振る舞いが見られる。したがって、円筒導波管部分には TM_{01} モードの他に非軸対称な TE_{11} モードの成分が大きく混在しているように見える。今後、ネットワークアナライザの較正を導波管フランジで行って再度測定し、矩形導波管から円筒導波管へのモード変換器部分の構造について詳細に解析する必要がある。



⑥-図 15. カプラー付き空洞の電界分布測定結果。実線は CST Studio の計算から得た振幅で、0.6 セルのピークに規格化してある。

⑦ 大強度高繰り返しレーザー開発

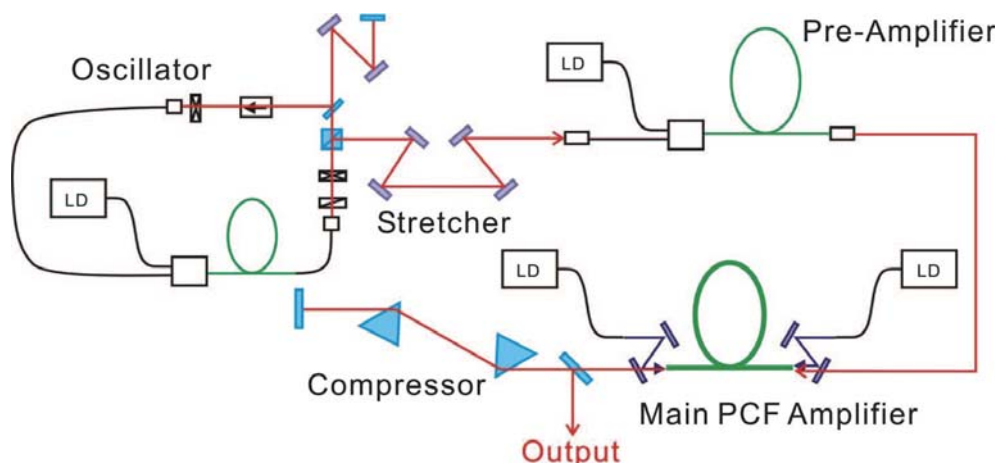
(再委託先：学校法人早稲田大学)

概要

早稲田大学では光共振器蓄積用のレーザーとして、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26年度は発振器の安定化、レーザー増幅システムの開発、高繰り返しレーザーのためのパルス逡倍化共振器開発の3項目に関して重点的に開発を推進した。発振器は非常に安定な構成を模索しつつ、外部同期のための素子を導入し、増幅システムに関しては、高出力のメインアンプを省いた状態であるが、チャープパルス増幅（以下、「CPA」という）システムの構成を完了した。パルス逡倍化共振器では逡倍化を実証するとともに、今後の共振器蓄積における知見を蓄積することに成功している。

⑦-1 高安定ファイバーレーザー発振器開発

早稲田大学では光共振器蓄積用の大強度高繰り返しレーザー開発を行っている。まず計画の概要図を以下の⑦-図1に示す。

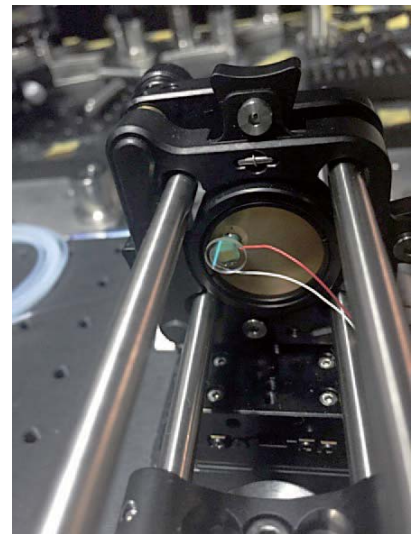
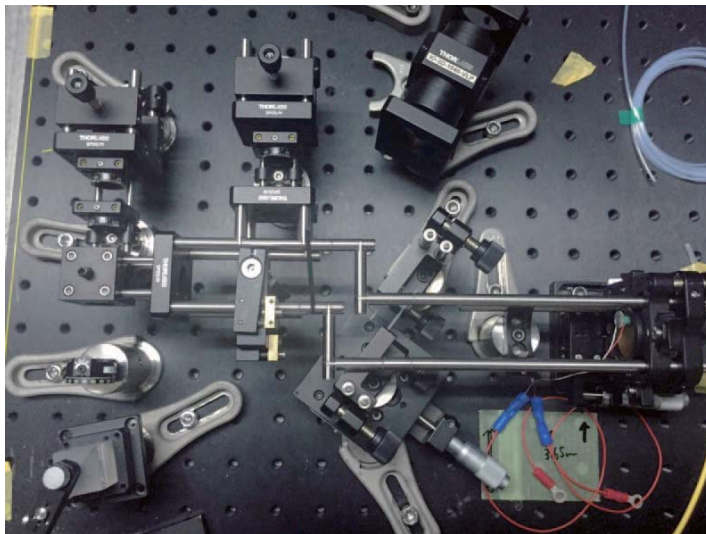


⑦-図1. 大強度高繰り返しレーザーシステム概念図

高安定のレーザー発振器によりレーザー発振を行い、その後ストレッチャーでパルス幅を拡張し、増幅、その後圧縮するという CPA システムを構築し、大強度化する。

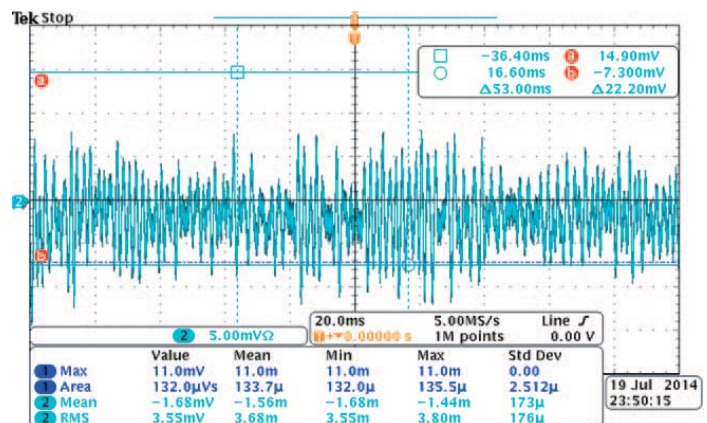
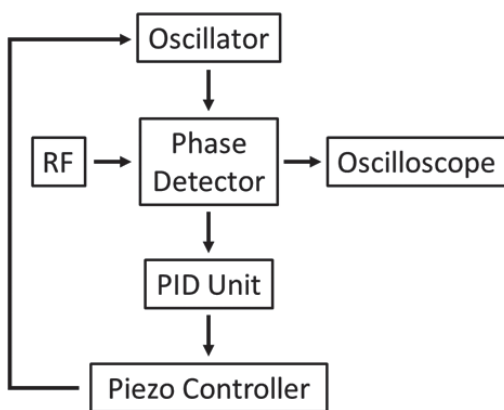
平成26年度はレーザー発振器の安定化、メインアンプを含まない CPA システムの構築と評価、図には示していないが、高繰り返し化を可能とするパルス繰り返し逡倍化共振器の開発を主に行った。本節ではレーザー発振器開発を、次節では CPA システムの開発状況、最後にパルス繰り返し逡倍化共振器開発の現状に関して報告する。

レーザー発振器はレーザーの性能を決める最も重要な要素となる。非常に良い性能を達成し、その品質を維持したまま増幅するということが求められる。光共振器蓄積においては光蓄積共振器の長さと同発振器の長さをナノメートル以下で一致させることが求められるため、非常に安定な発振器が必須である。そこで平成26年度は安定なレーザー発振器開発を行った。⑦-図2に安定化のために発振器光路にガイドを付属した発振器の写真を示す。



⑦-図 2. 安定化 Yb 添加ファイバー発振器 (左図) 全体の外観図 (右図) 共振器長調整用圧電素子を付属したミラー

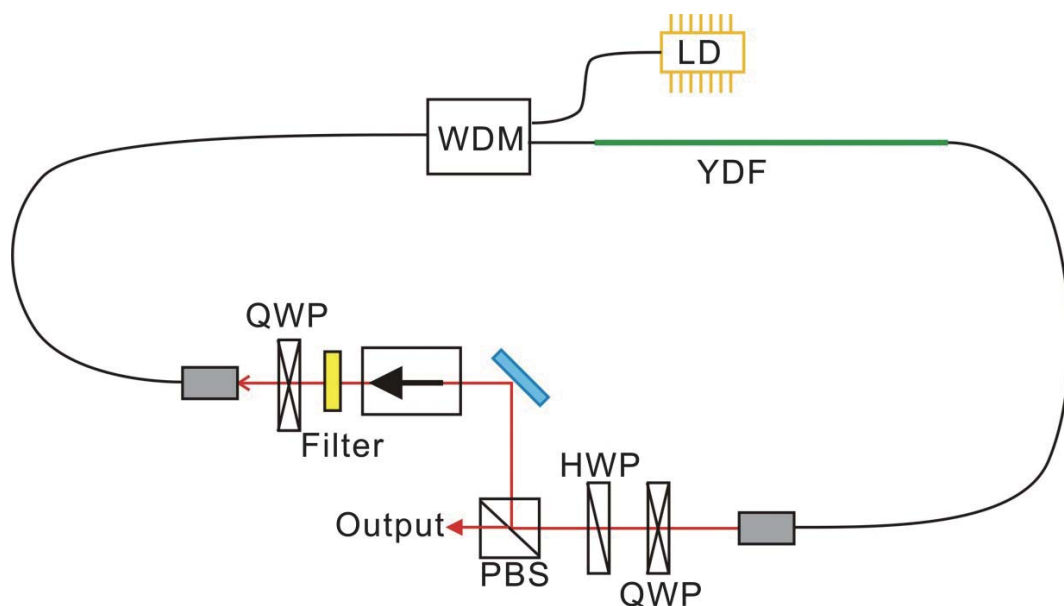
本システムでは、自由空間中の光学機器を全てガイドし、共振器長を安定化させている。右図には共振器長を微調整するための圧電素子にマウントした折り返しミラーを示す。これにより共振器長を高速でフィードバックすることが可能である。以下の⑦-図 3 にこの圧電素子を用いたタイミング同期セットアップとその結果を示す。



⑦-図 3. タイミング同期システム図 (左図) とその結果のタイミングジッター計測 (右図)

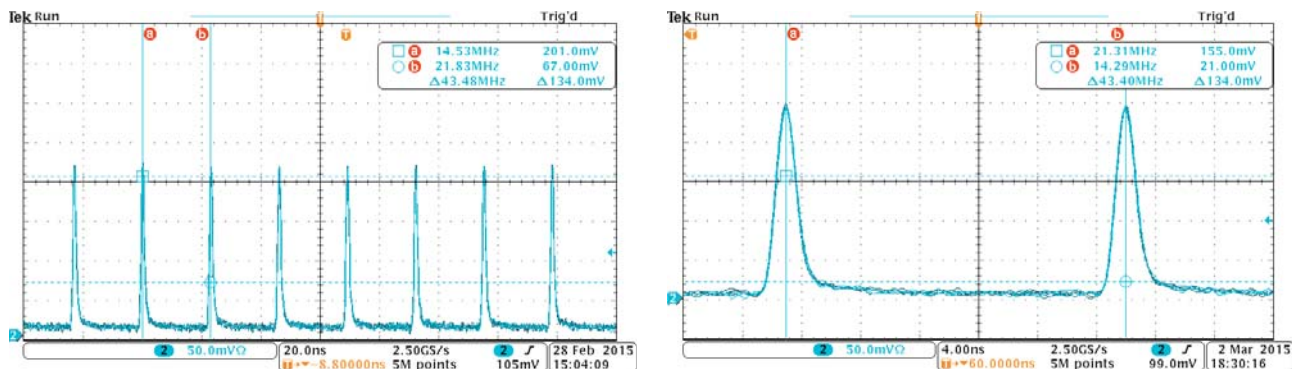
⑦-図 3 に示すように、外部クロックとの同期を行う回路を構築した。これは外部蓄積共振器の代わりにクロックとの同期（共振器長制御）を行っていることにあたる。外部クロックとの位相差を検出し、それを圧電素子にフィードバックすることによって同期を実現している。その結果を示したものが右図となっており、同期精度として 3.2 ps が得られている。これによって実際に共振器長制御が高速で行えることを実証したとともに、比較的安定な発振器が製作できることを明らかにした。

次により安定な発振器構成を目指して新たな発振手法の試験も並行して行った。これまでの発振手法ではグレーティングによってファイバー内の分散を補償することによってファイバー内において超短パルスを維持している。このような場合にはファイバーを含んだ閉ループ内でソリトンとして存在する解があり、モードロッキングを実現する。それに対して、以下の⑦-図4に示すようにファイバー入射前に狭帯域のフィルタを用いることによってファイバー入射前のパルス幅を常に短くし、ファイバー内における非線形光学を増強することでモードロッキングが可能である。この時には閉ループ内ではシミラリトン（相似形のパルス形状を維持する波）として解が存在する。

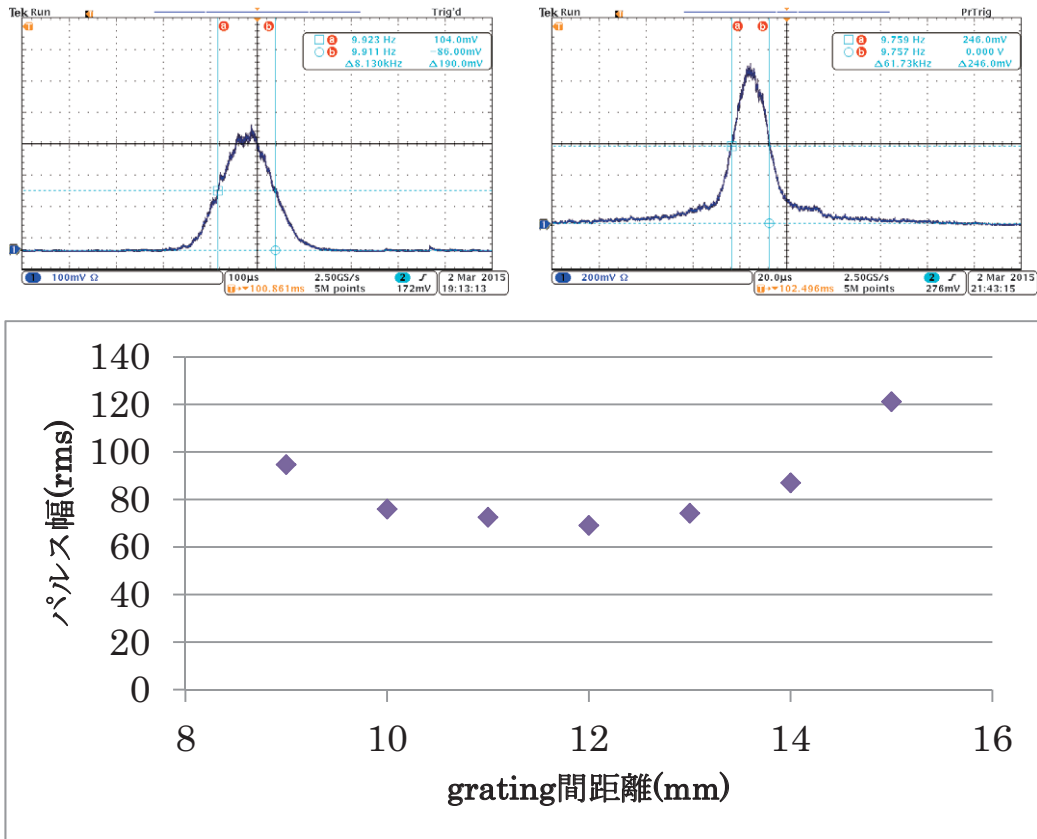


⑦-図4. シミラリトン型ファイバーモードロックレーザー発振器構成図

⑦-図4に示すような発振器構成では、構成が非常に単純であるため、安定化も非常に容易であることが、本研究の推進において大きな利点となる。このような構成で発振したレーザーパルス波形を以下の⑦-図5に、そのパルス幅計測及びパルス幅圧縮結果を⑦-図6に示す。



⑦-図5. シミラリトン型発振器のパルス発振波形

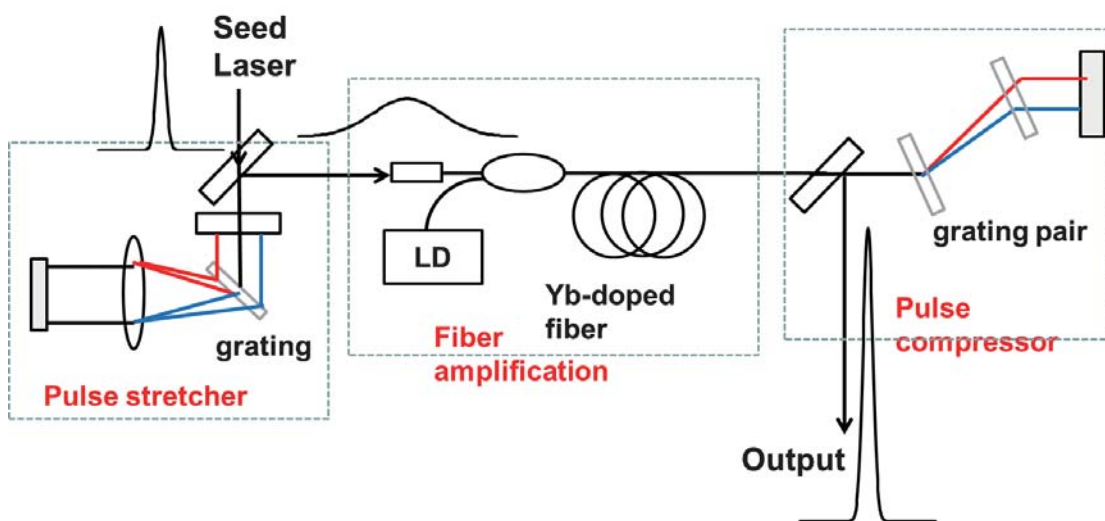


⑦-図6. シミラリトン型発振器の出力パルス幅とその圧縮結果

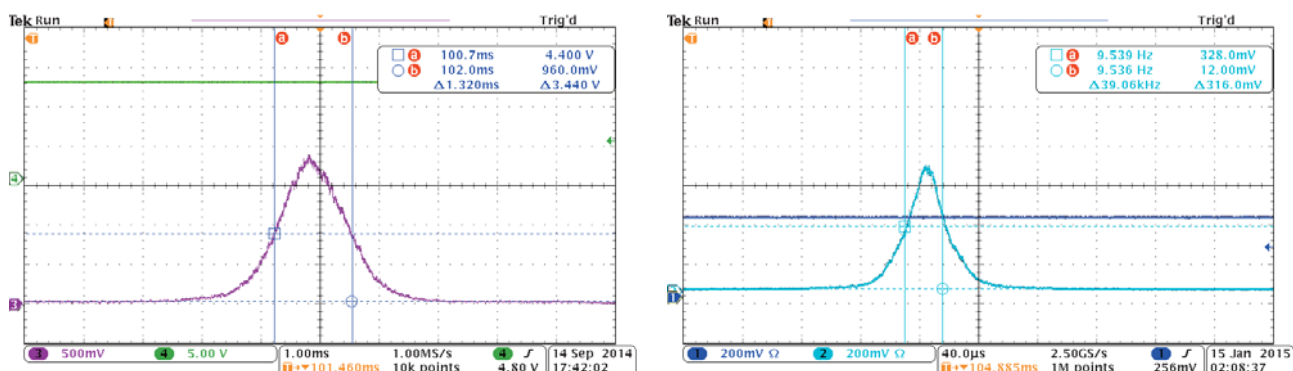
まずパルス繰り返し 40 MHz での発振を確認した。このシミラリトン型の発振器では分散補償を行っていないため、分散が残ったままで発振する。したがって得られたパルス幅は 1.37 ps (半値全幅) と比較的長いものの、その後圧縮することによって 162.4 fs (半値全幅) まで圧縮が可能であることが分かった。スペクトル幅・出力・パルス幅ともに十分な性能であり、これを高繰り返し化することによってより安定な共振器を模索していく。

⑦-2 チャープパルス増幅システム構築と評価

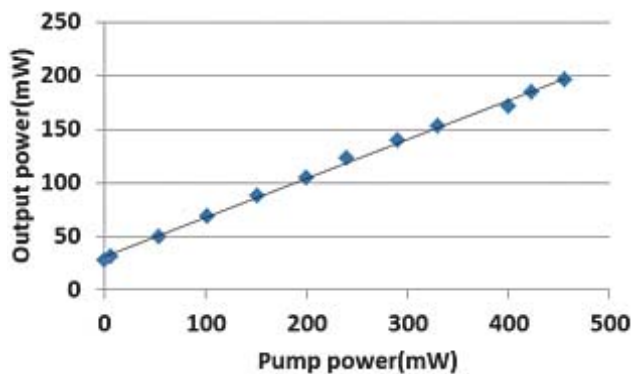
発振器後に増幅を行い、大強度レーザーを実証するが、ファイバー内を伝搬するレーザー光は非常に細いため、非線形光学効果によってパルスが崩れてしまう。そこで、増幅前にパルス伸長器(ストレッチャー)でパルス幅を広げ、その後増幅を行い、最終的に圧縮(コンプレッサー)して元に戻すという操作を行う必要がある。これをチャープパルス増幅と呼んでいる。平成 26 年度はメインアンプを含まないプリアンプのみによるチャープパルス増幅システムを構築し、その評価を行った。システム図を⑦-図7に示す。発振器からのパルスを一度グレーティング等で伸長し、増幅、その後またグレーティングによって圧縮することによってパルスを破壊することなく増幅し、かつ圧縮することで強いピーク強度が得られる。パルス伸長、圧縮した際のパルス幅の計測結果を⑦-図8に示している。発振時には 146 fs だったパルス幅を伸長器によって 18.9 ps まで約 100 拡げ、その後増幅を行い、最終的に圧縮し、127 fs の極短パルスを得た。



⑦-図 7. チャープパルス増幅システム構成図



⑦-図 8. 伸長したパルス幅計測結果（左図）と増幅後の圧縮したパルス幅計測結果（右図）



⑦-図 9. プリアンプの励起光と出力光パワーの関係

プリアンプにおける励起光強度と出力光のパワーの関係を⑦-図9に示した。最大で204 mWの出力を得ている。それぞれのステージにおけるパルス幅とパワーの関係を現在の評価状況として以下の⑦-表1にまとめた。

⑦-表1. 各コンポーネント出力時のパワーとパルス幅

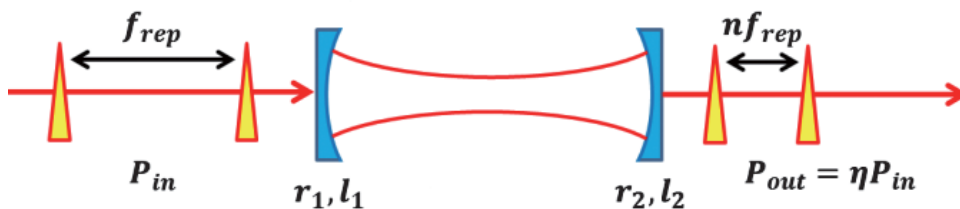
コンポーネント	パワー mW	パルス幅 fs
発振器出力	32.4	146
ストレッチャー出力	24.0	18900
プリアンプ出力	204	
コンプレッサー出力	183	127

それぞれのコンポーネントにおける効率、増幅率とともに伸長率、圧縮率が見て取れる。メインアンプによってワット以上に増幅していくこととなるが、現状としては十分な性能が得られていることがわかる。

⑦-3 パルス繰り返し通倍化共振器開発

ファイバーレーザー発振器はファイバー中における非線形光学効果によってパルス形成を行う。そのために発振器ではファイバー長がある程度必要であり、これによってパルス繰り返しが制限されることになる。そこでパルスを高繰り返しにするためにパルス繰り返しを通倍化する光共振器開発を行っている。これによりパルス繰り返しが通倍できるだけでなく、ファイバー増幅において問題となる自然放出光（以下「ASE」という）を抑制するフィルタとしても動作させることが可能である。

以下の⑦-図10に通倍化共振器の概念図を示す。

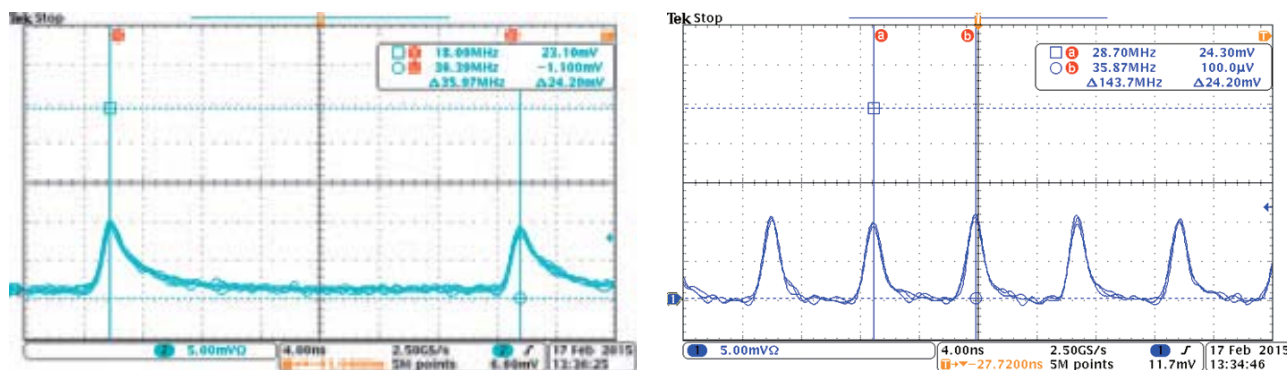


⑦-図10. パルス通倍化共振器概念図

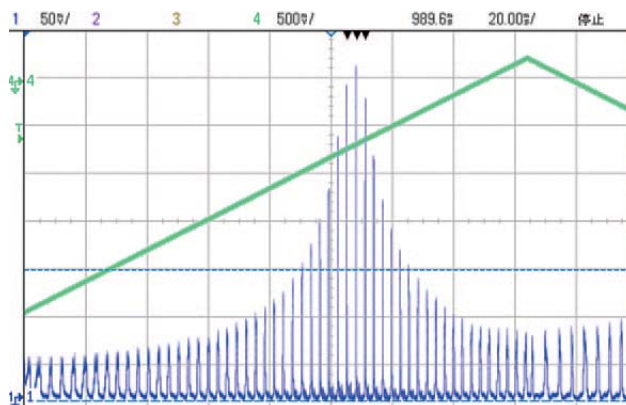
入射パルスの繰り返しの整数分の一の周回時間を持つ光共振器によってパルスの通倍化が可能である光共振器である。共振器からの出力パルスは繰り返しが通倍化されているとともにスペクトル分布においても共振器によって整形される。また、ASEは光共振器へは蓄積されないため、共振器を通過した光にはほぼASEがない、パルスを構成する光のみで構成されており、以降の増幅に際して非常に適したレーザー光が得られる。

これによって通倍化した前後のパルス波形を以下の⑦-図 11 に、光共振器への蓄積の様子 (Airy Function と呼ぶ透過光強度の計測結果) を⑦-図 12 に示す。

⑦-図 11 を見てわかる通り、共振器通過後のパルスは繰り返しが4 通倍されている。今回の共振器における通倍化効率は約 1% であった。計算上の理想的な効率は 3.3% であり、今後よりロスが少ない共振器を用いることによって改善が見込まれる。⑦-図 12 に示した Airy Function によって、本研究開発で製作しているレーザー発振器は光共振器蓄積が可能であることを示している。非常にスペクトル幅の広いレーザー光が得られているため、高フィネス共振器への蓄積にはキャリアエンベロープ位相の補正が必要であることを示唆している。今後の開発の方針を示す非常に良い成果を得ることができた。



⑦-図 11. 通倍化前 (左) 後 (右) のパルス波形



⑦-図 12. 通倍化光共振器の Airy Function

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)

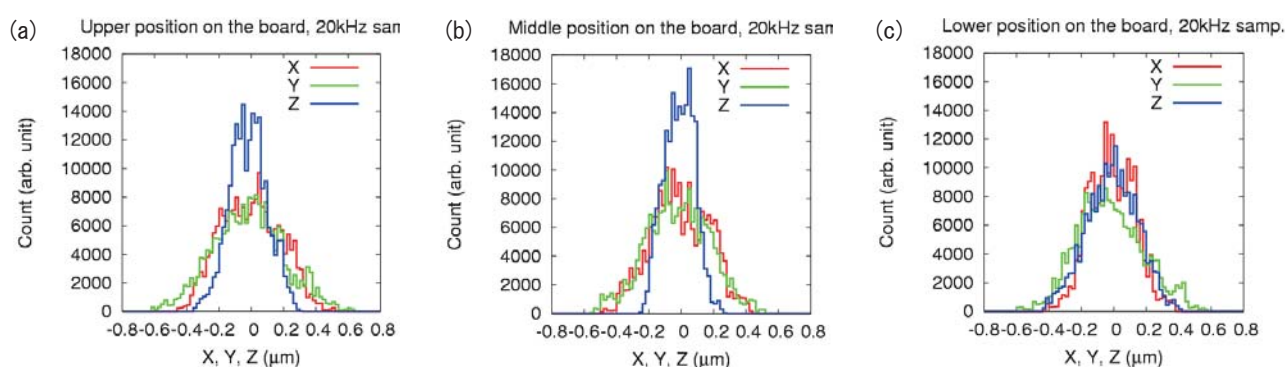
概 要

独立行政法人産業技術総合研究所が所有する S バンド小型リニアック施設を利用して国立大学法人東北大学、株式会社リガクと協力して Talbot 干渉計を用いた位相イメージング実験を行った。Talbot 干渉計を設置する光学台の振動計測及びモアレ縞の測定を行った。X 線検出器には、X 線 CCD カメラとイメージングプレート、シリコン半導体検出器を使用した。

⑧-1 Talbot 干渉計を用いた X 線位相イメージング実験

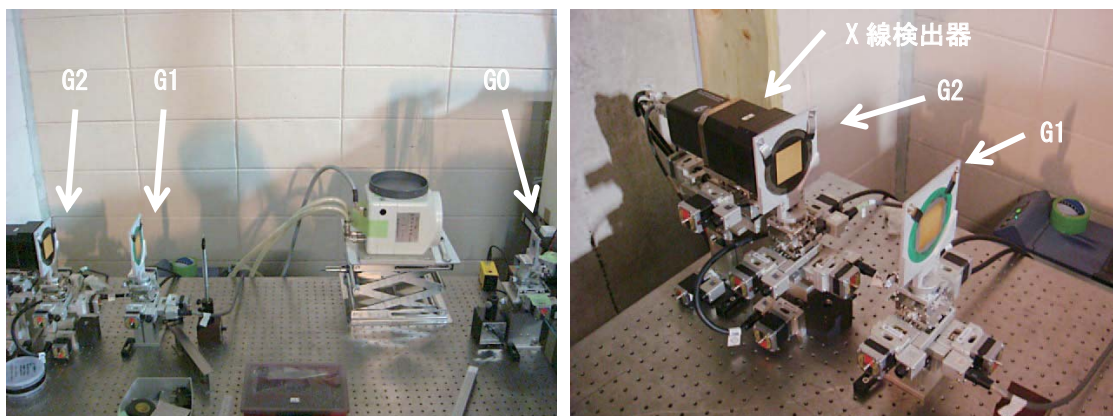
実験に先立ち、Talbot 干渉計を設置する光学台の製作とその振動測定を行った。Talbot 干渉計に使用する回折格子には数 μm ピッチの凹凸があるため、光学台の振動がそれよりも大きいと明瞭なイメージング画像を取得することができない。特に、光学台設置場所の周辺には真空ポンプ等が置いてあり、振動の影響が懸念されていた。アルミフレームで組み上げた架台と光学定盤の間に防振パッドを入れ込むことで床からの振動の影響を極力小さくした構成とした。

振動計を用いて光学台上の X 線入射方向に沿った 3 か所の振動の大きさを測定した結果を⑧-図 1 に示す。この測定結果から、振動の大きさは $\pm 0.5 \mu\text{m}$ であることと光学台上の上流と中間位置の光学台面内での振動の大きさは同程度であり、水平面内の振動に対して光学台に垂直な方向の振動の大きさの方が小さいことが分かった。また、下流位置では、水平と垂直どちらの振動の大きさも同程度あることが分かった。この測定結果より、光学台に垂直方向の振動の大きさが小さいため、回折格子の向きを水平方向にして光学台に設置することとした。



⑧-図 1. Talbot 干渉計を設置する光学台上 3 か所の振動の大きさの測定値。(a) X 線入射側の上流位置、(b) 中間位置、(c) 下流位置。X と Y は光学台平面を表し、Z は光学台に垂直な方向を示す。分布の幅が広い方が振動の大きさが大きいことを示す。

Sバンド小型リニアックにおいて国立大学法人東北大学の協力の元、Talbot 干渉計を用いた位相イメージングの実験を行った。Talbot 干渉計の設置写真を⑧-図2に示す。X線の入射方向から最初の格子をG0、次の格子をG1、最後の格子をG2として表記する。X線イメージング用の検出器はG2の直後に設置した。電子ビームとレーザーの衝突点からG0までの距離は2,355 mmであり、G0格子の大きさが $20 \times 20 \text{ mm}^2$ であるためレーザーコンプトン散乱X線の検出角度範囲は $\pm 4.2 \text{ mrad}$ である。



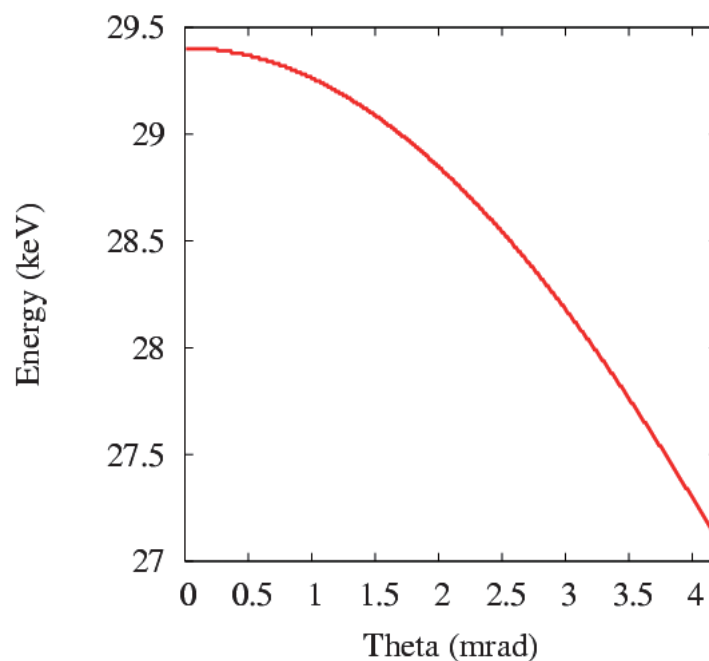
⑧-図2. Talbot 干渉計の設置図。X線は、紙面左側から入射する。光学台上流側から最初の格子をG0、次の格子をG1、最後の格子をG2とする。X線検出器はG2の直後に設置した。

⑧-表1には実験時の電子ビーム、レーザー、レーザーコンプトン散乱X線のパラメータをまとめた。また、⑧-図3にはX線の散乱角度によるエネルギーの計算結果を示す。G0で取り込める角度範囲である 4.2 mrad まで計算した。中心（散乱角 0 mrad ）のエネルギーが最も高く、散乱角が大きくなることでX線のエネルギーが低下することが分かる。X線エネルギーの平均値は 28.3 keV であった。

レーザーコンプトン散乱X線が発生するまでの流れについて簡単に述べる。電子ビームとレーザーを衝突させるためには、両者を空間的及び時間的にオーバーラップさせる必要がある。空間アライメントには、アルミナ蛍光スクリーンを使用した。また、第一段階のタイミング調整にはストリークカメラを使用し、微調整は衝突点下流側にあるマイクロチャンネルプレート(MCP)の出力信号が高くなるように、レーザーのタイミングを調整することを行った。尚、本実験では、幾何学的条件からレーザーと電子ビームの衝突角は 15 度 とした。

⑧-表 1. X線位相イメージング実験時の電子ビーム、レーザー、レーザーコンプトン散乱X線のパラメータ

電子ビーム	
エネルギー	35 MeV
電荷量	0.5 nC/bunch
繰り返し	10 Hz
ビームサイズ	50 μm (rms)
Ti:Sa レーザー	
波長	800 nm
パルスエネルギー	180 mJ
繰り返し	10 Hz
ビームサイズ	50 μm (rms)
衝突角度	15 度 (0 度が正面衝突)
レーザーコンプトン散乱 X 線	
検出器取り込み角度範囲	0 ~ 4.2 mrad
エネルギー	27.1 ~ 29.4 keV
繰り返し	10 Hz
光子数	4×10^6 photons/s



⑧-図 3. 実験条件から計算したX線エネルギーの角度依存。

X線イメージング検出器には、X線 CCD カメラの PI-SCX1300 とイメージングプレートとを使用した。X線 CCD カメラは、厚さ 0.3 mm の $Gd_2O_2S:Tb$ シンチレータに CCD カメラが接続されている。ピクセルサイズは $20 \times 20 \mu m$ であり、ピクセル数は 1300×1340 である。G2 の直後に X線 CCD カメラとイメージングプレートを設置して測定したモアレ縞を⑧-図 4 に示す。G2 をビーム軸に対して垂直な方向に離散的に移動しながらモアレ縞を測定することで、位相像が取得される。

位相像の鮮明さを表す指標の一つにビジビリティがある。⑧-図 4 に示すように、モアレ縞の強度の高い部分の平均値を N1 (図中白枠線の平均値)、強度の低い部分の平均値を N2 とし、ビジビリティを $(N1-N2) / (N1+N2)$ と定義した。ビジビリティは以下のようになった。

X線 CCD カメラ： $(1147-962) / (1147+962) = 8.8\%$

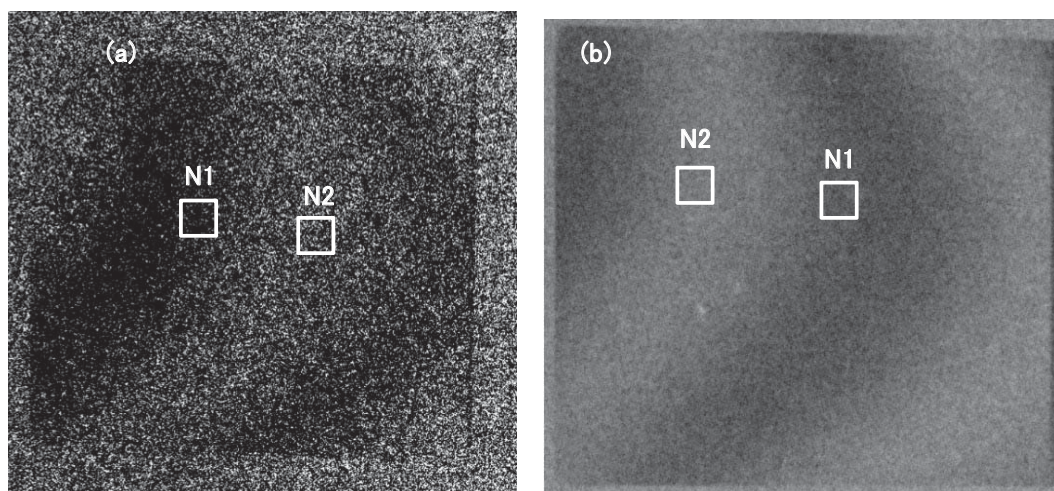
イメージングプレート： $(42915-32546) / (42915+32546) = 13.7\%$

また、コントラストを $N1/N2$ と定義すると、以下のようになった。

X線 CCD カメラ： $1147/962 = 1.19$

イメージングプレート： $42915/32546 = 1.32$

この結果から分かるように、ビジビリティとコントラストどちらにおいても X線 CCD カメラよりもイメージングプレートの方が高い値になることが分かった。参考値として、国立大学法人東北大学の位相イメージング装置のビジビリティは 22% 程度である。東北大学では X線源には X線管球、X線検出器には X線 CCD カメラを用いているため、本実験で得られたビジビリティが低い要因は、S バンド小型リニアックで発生可能なレーザーコンプトン散乱 X線の強度が X線管球に比べて圧倒的に低いことが原因であると考えられる。

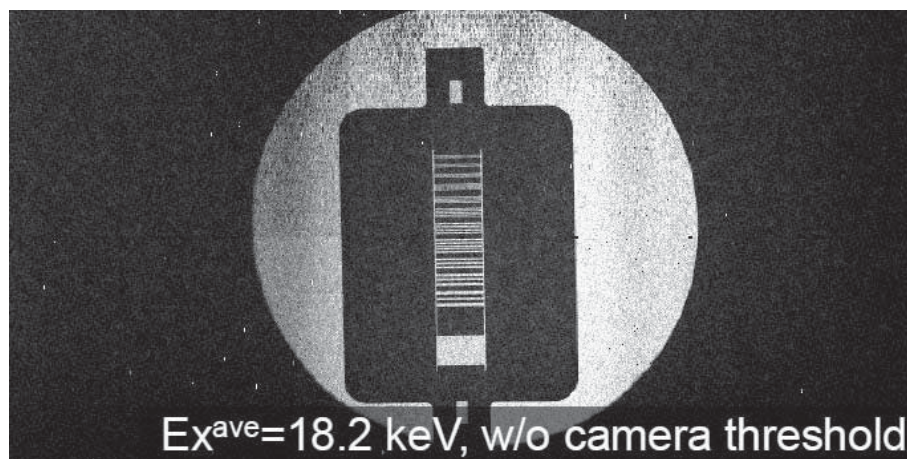


⑧-図 4. (a) X線 CCD カメラと (b) イメージングプレートを用いて測定したモアレ縞。色が黒いほど X線の強度が高いことを表す。

他の X線検出器を用いるとビジビリティは向上するのかを確かめるために株式会社リガクの HyPix-3000 を用いて実験を行った。HyPix-3000 は、シリコン半導体検出器であり、ピクセルサイズ $100 \times 100 \mu m$ 、ピクセル数 775×385 である。この検出器は 20 keV 以下の低エネルギー X

線に対して高感度である。例えばエネルギー 8 keV の特性 X 線である CuK α 線に対する検出効率は 99% であるのに対し、エネルギー 17.5 keV の MoK α 線に対する検出効率は 38% にまで低下する。

レーザーコンプトン散乱 X 線のエネルギーをシリコン半導体検出器の感度域に合わせるため、電子ビームのエネルギーを 27.8 MeV に下げて実験を行った。4.2 mrad までの X 線の平均エネルギーは 18.2 keV である。その際の分解能チャート撮影画像を以下の⑧-図 5 に示す。



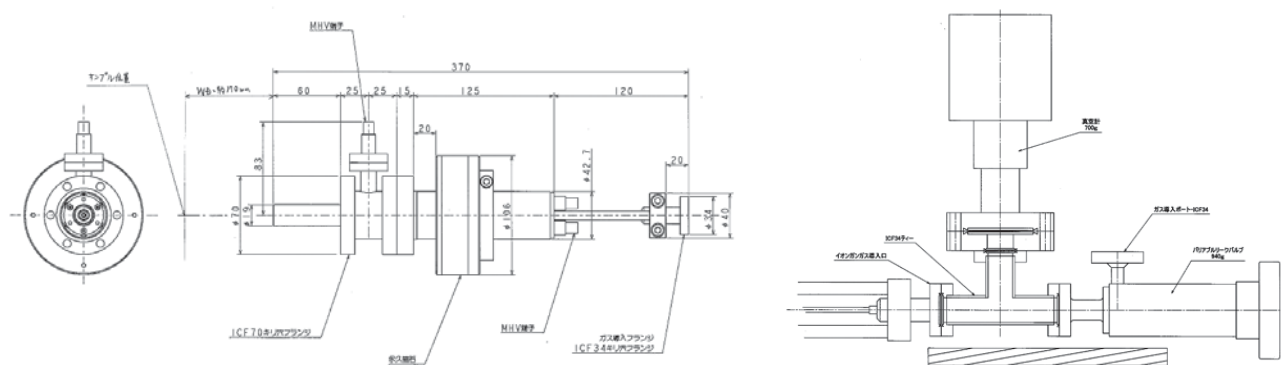
⑧-図 5. HiPix-3000 による分解能チャート撮影画像

独立行政法人産業技術総合研究所で実験する直前に国立大学法人東北大学においてもシリコン半導体検出器を用いて同様の格子の組み合わせで実験を行い検出器で測定されるカウント値の比較を行った。その結果、東北大学のシステムに比べてカウント値が 25,000 分の 1 であることが分かった。シリコン半導体検出器を用いてもモアレ縞を測定することができたが、実験中にレーザー増幅用の Ti:Sa 結晶が損傷したため、これ以上の実験を行うことができなかった。

⑧-2 小型光陰極蒸着装置の開発

光陰極はモリブデン母材を加工して表面を研磨した後、CsTe 等の光陰極材料を蒸着する。電子ビームの放出特性はカソード表面の状態に大きく依存するため、十分に清浄な表面を得ることが重要である。高周波電子銃内部では不定期に放電が発生し、カソード材に蒸着した光陰極材料の劣化や、不純物の吸着による量子効率の低下が問題となっている。そこで真空容器内においてアルゴンやヘリウム等のイオンを用いたスパッタリングにより、カソード表面の不純物を除去し、電子加速器の電子ビームの放出特性を均一化するための装置を導入することとした。具体的には Ar や He 等のイオンをカソードに照射してスパッタリングにより表面を清浄する装置を設計し、これを導入した。本研究にて開発したカソードクリーニング装置の概略図⑧-図 6 に示す。カソード表面を均一に照射するためイオン銃前面から 1 cm ~ 20 cm において半値幅 15 mm 以上のビーム径が得られる設計となっている。最大イオン加速電圧および最大電流はそれぞれ 3 kV、25 μ A 以上である。イオン銃の後ろにはバリアブルリークバルブ及びガス圧モ

ニター用真空計を設置し 10^{-4} Pa 以下のガス圧を測定することが可能である。スパッタ用の真空チャンバーに本装置を設置した (⑧-図7)。アノード電圧 2 kV、ディスチャージ電圧 55 V、Ar ガス圧 6.6×10^{-6} Torr において、SUS 試料へアルゴンイオンを照射したところイオン電流として $1.4 \mu\text{A}$ を観測し、正常に動作していることを確認した。



⑧-図6. (左) 設計、製作したカソードクリーニング装置および (右) ガス導入口および真空計モニターの配置図。



⑧-図7. スパッタ用真空チャンバーに設置されたカソードクリーニング装置。

⑨ スポーク型超伝導空洞開発にお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

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 スポーク型超伝導空洞開発を進めている。マルチパッキングが運転の障害とならない空洞形状を追及するため、CST studio suite によるマルチパッキング・シミュレーションを行った。空洞端版の角の丸みが異なる複数のモデルのシミュレーション及びスポーク付け根の丸みを変えた場合についての同様のシミュレーションの結果を踏まえ、空洞の最終形状を決定した(⑨-図2の Model-9)。

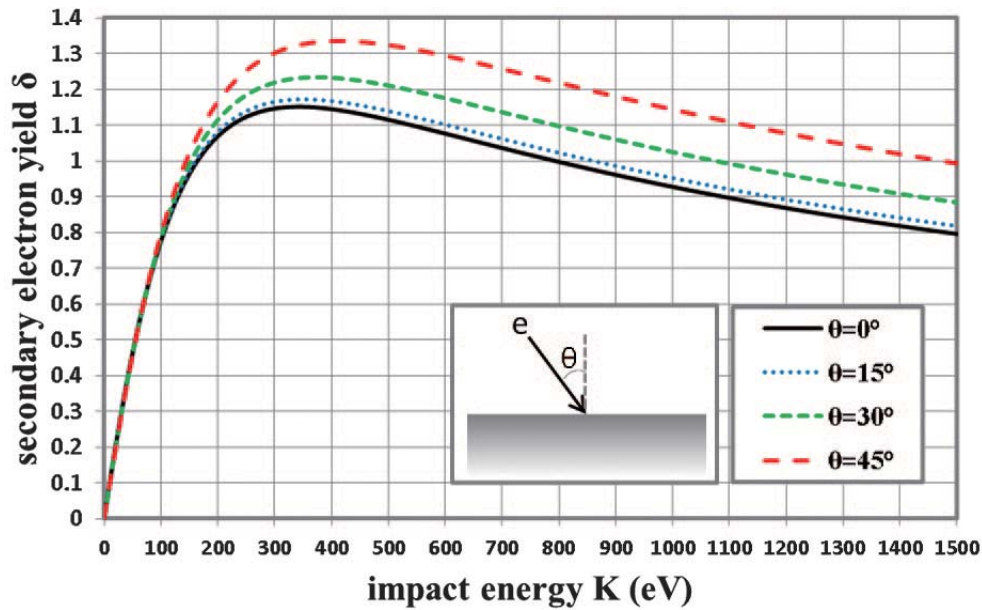
実際の空洞には、入力ポートや化学処理用ポート、高圧洗浄用ポートが必要であるため、最終形状にポートを付けた場合の同様の計算を行い、ポートの追加による新たな MP の有無を確認する必要がある。この確認作業は現在進行中である。

また、スポーク空洞のプレス加工について検討を行い、金型の設計を行った。また、独立行政法人日本原子力研究開発機構と協力してスポーク空洞のプレス加工について検討を行った。

⑨-1 はじめに

平成 25 年度に、参画機関である独立行政法人日本原子力研究開発機構により遺伝的アルゴリズムを用いた空洞形状の最適化が行われた。最終的な空洞形状の決定には、更にいくつかの制約条件を考慮する必要がある。その一つがマルチパッキング(以下、MP という)である。MP とは次のような現象である。宇宙線や電界放出電子の衝突等を引き金として、空洞壁面は電子を放出する(一次電子)。一次電子が空洞内電磁場により加速され空洞壁面に衝突すると二次電子が放出(Secondary Electron Emission、以下 SEE という)される。一次電子 1 個あたりが放出する二次電子数 δ を二次電子放出係数と呼ぶ。⑨-図 1 に示すように、 δ は衝突の運動エネルギー K と衝突角度 θ に依存する。これら $\delta(K, \theta)$ 個の二次電子も空洞内の電磁場の影響を受けて加減速され、また空洞の壁面に衝突し、新たな二次電子を生成する。 $\delta = 1$ を与える K を $K_1(\theta)$ 、 $K_2(\theta)$ として、 $K_1 < K < K_2$ が成立している限り入射する一次電子より多くの二次電子が放出され、カスケードが持続する。特に、電子の放出と衝突が RF 周期と同期し、世代に依らずエネルギー $K_1 < K < K_2$ で壁面と衝突する場合、電子数は際限なく増加する。これが MP である。MP が発生すると、空洞内のエネルギーは無数の二次電子によって浪費されてしまい、空洞にパワーを投入する際、加速電場が運転に必要なレベルに到達しないこともある。超伝導空洞では、これによる昇温でクエンチに至る可能性があり、十分な注意が必要である。

我々は、最適な空洞形状のいくつかについて MP シミュレーションを行い、空洞形状毎に MP の発生状況を比較することにした。シミュレーションには CST studio suite を用いた。このソフトウェアは、3次元電磁場計算や粒子追跡の機能に加え、二次電子放出の確率モデルである Furman model を備えており、これまでも空洞設計のための MP シミュレーションに用いられてきた実績がある。以下で、CST studio suite による MP シミュレーションの手法、結果及びそれを基に決定された空洞形状について報告する。



⑨-図 1. 二次電子放出係数。横軸は衝突の運動エネルギー。各曲線は異なる衝突角度に対応する。

⑨-2 シミュレーションの方法

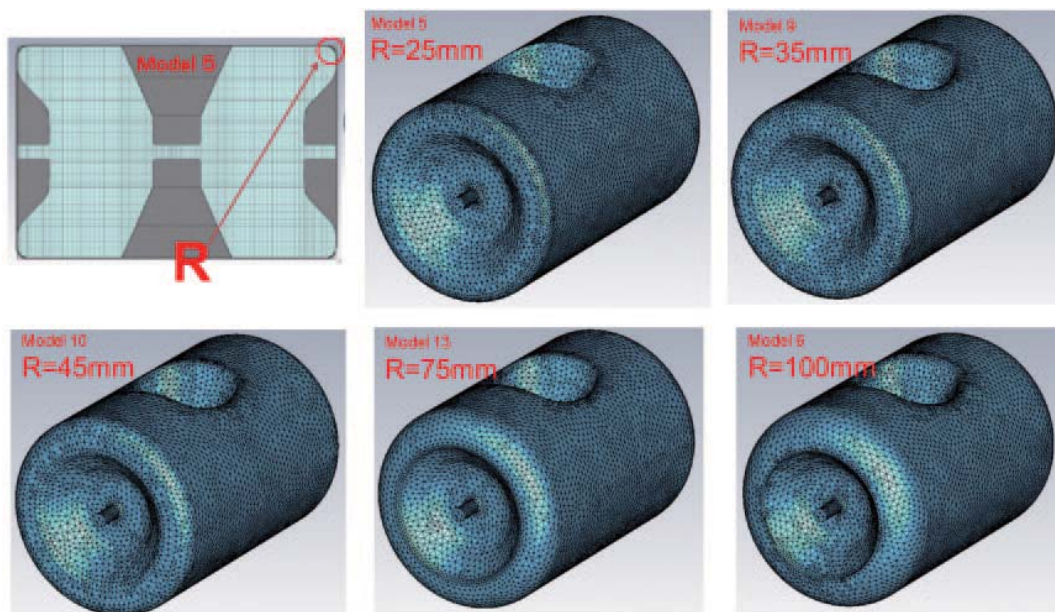
シミュレーションの手順は以下の通りである。(i) MW Studio Eigenmode solver (MWSE) を用いて、空洞内の電磁場分布を計算する。複雑な空洞形状に柔軟に対応できるように、mesh 形状は tetrahedral mesh とする。(ii) Particle Studio (PS) に切り替え、二次電子放出に関する設定を行う。(iii) 一次電子放出面の設定を行う。MP の発生を見逃さないよう、一次電子数は可能な限り多く取る。ここでは、一次電子数を $10^3 \sim 10^4$ 個程度、エネルギーを数 eV に設定する。(iv) MW Studio Eigenmode solver で計算した電磁場分布を取り込み、Particle Studio TRK solver または PIC solver を用いて電子の運動を追跡する。ここでは、二次電子数が 10^6 個程度 (\gg 一次電子数) になるまで追跡を続けることにする。これを E_{acc} を変えながら繰り返す。(v) 異なるモデルについても上と同様の手順で計算を行う。

二次電子放出係数の設定においては、Tesla 型空洞で MP が発生しない程度に小さくとる必要がある。Tesla 型空洞における MP は簡単に process されることが知られており、スポーク型超伝導空洞においても同程度の表面清浄度が得られる事が期待されるからである。この要求を満たすものとして、我々は⑨-図 1 に示された二次電子放出係数を用いる。

シミュレーション結果の解析の際には、電子数の変化、電子の軌道、衝突エネルギー、平均二次電子放出係数に注目すると良い。特に、平均二次電子放出係数 $\langle\delta\rangle$ は MP の発生とその激しさを示す。 $\langle\delta\rangle$ は、

$$\langle\delta\rangle = \frac{\text{全放出電子数}}{\text{電子が壁を叩いた回数}}$$

で定義され、CST では Collision Information の値を用いて、 $\langle\delta\rangle = \text{SEE current} / \text{current}$ により計算可能である。MP 発生時には $\langle\delta\rangle > 1$ となり、 $\langle\delta\rangle$ が大きい程、電子数の増加が激しい。



⑨-図2. 最適化された空洞形状の例。それぞれ端板の角の丸みが異なっている。

⑨-3 シミュレーション結果と Model の選定

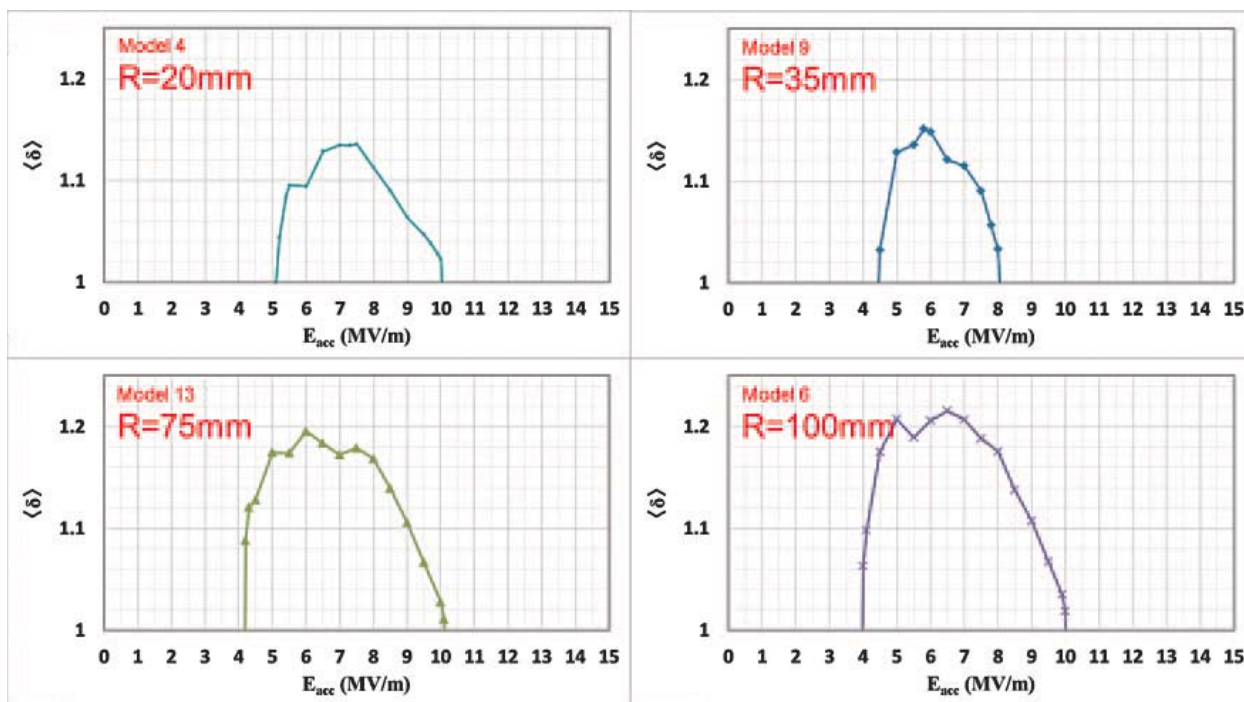
まず、⑨-図2に示すような、端板の角の丸み R が異なる複数の空洞について MP シミュレーションを行った。⑨-図3に、 $\langle\delta\rangle$ を E_{acc} の関数としてプロットしたものの例を示す。 $\langle\delta\rangle > 1$ が MP の発生を示す。ある特定の区間においてのみ MP が発生していることが分かる。 E_{acc} が小さいところでは衝突エネルギーが小さ過ぎることにより、逆に E_{acc} が大きいところでは衝突エネルギーが大き過ぎることにより、 $K_1 < K < K_2$ が満たされず、MP は発生しない。また、MP 発生区間の位置や幅、 $\langle\delta\rangle$ の最大値は、角の丸み R に依存している。角の丸み R が違えば、同じ E_{acc} でも MP 発生点付近の電場や磁場の強さ、そして衝突エネルギーや壁との衝突角度が異なるからである。特に、衝突角度が浅くなると、⑨-図1に示すように δ の最大値が増大し、 $\langle\delta\rangle$ の最大値が増大する。

MP のリスクを低減するには、適切な角の丸み R を選択すれば良い。我々は、⑨-図4に示すように、 $\langle\delta\rangle - E_{\text{acc}}$ 曲線と $\langle\delta\rangle = 1$ によって囲まれた領域の面積を比較した。面積を最小化する

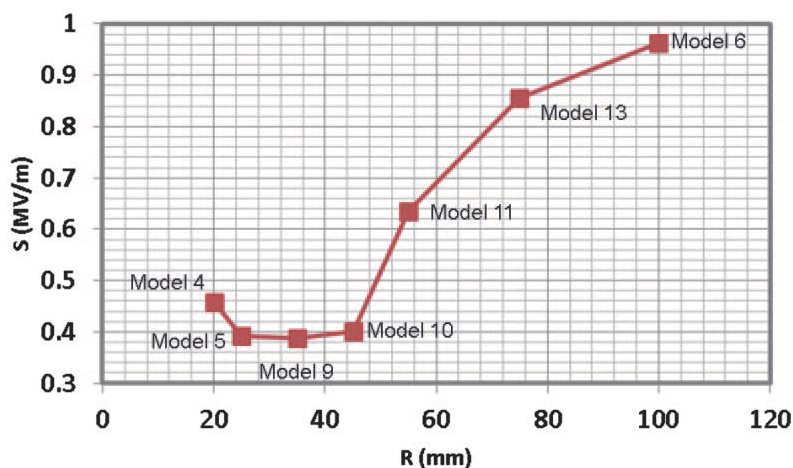
形状は Model-9 ($R = 35 \text{ mm}$) であった。

次にスポークの根元の丸み R_b を 7 mm から 15 mm の間で変化させて同様の MP シミュレーションを行った。この範囲内では、異なる R_b 間のシミュレーション結果に大きな違いは見られなかった。我々は、ここまでのシミュレーション結果を踏まえ、最終的な空洞形状として、 $R = 35 \text{ mm}$, $R_b = 10 \text{ mm}$ を選択した (⑨-図 2 の Model-9 参照)。

実際の空洞には、入力ポートや化学処理用ポート、高压洗浄用ポートが必要であるため、最終形状にポートを付けた場合の同様の計算により、ポートの追加による新たな MP の有無を確認する必要がある。現在はこの確認作業を進めているところである。



⑨-図 3. MP の R 依存の例。Model-4、9、13、6 の結果のみを示す。



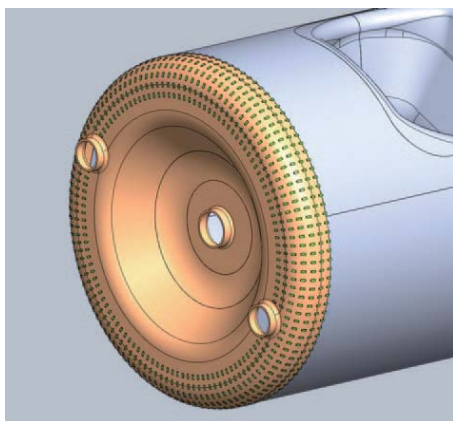
⑨-図 4. MP の R 依存。縦軸は $\langle \delta \rangle - E_{acc}$ 曲線と $\langle \delta \rangle = 1$ によって囲まれた領域の面積。

⑨-4 新たな製作技術の開発

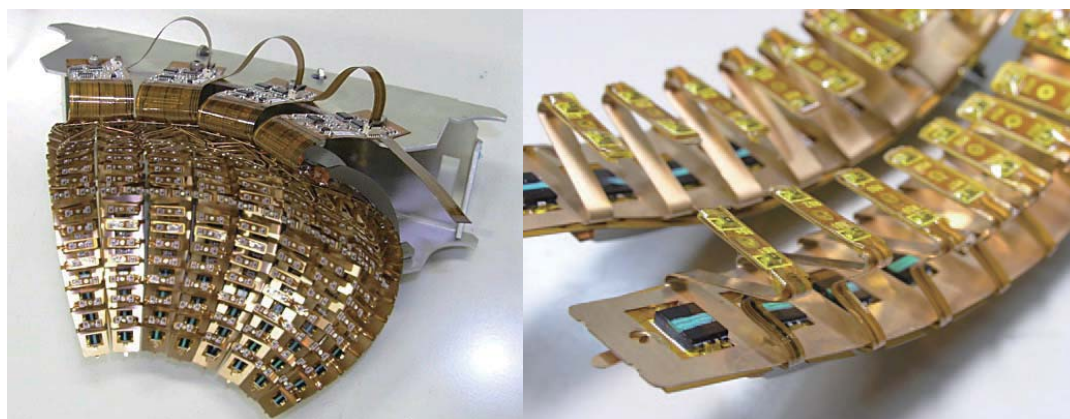
独立行政法人日本原子力研究開発機構と協力してスポーク空洞のプレス加工について検討を行い、金型の設計を行った。詳細は独立行政法人日本原子力研究開発機構の報告を参照。いっぽう電子ビーム溶接（EBW）時には固定治具が必要となる。この検討はプレス金型の構造などにも依存するため、金型の検討と平行して進める事になる。

⑨-5 非破壊検査検討

高周波電力投入時に超伝導空洞の温度上昇分布を測ることが出来ればMPの発生場所を特定できる可能性がある。多数の温度センサーを使用し温度上昇の分布を高密度で測る事を検討している（⑨-図5参照）。これら多数の温度センサーの熱接触を安定に保つには、適切な圧力で多数の温度センサーを空洞外壁に押しつける必要がある。多数の温度センサーの熱接触を確保する構造の検討を行っているが、まだ本体がないため、従来型空洞用の試作装置を活用し、センサーの実装装置の固定を試みたが、個々のセンサーの電氣的絶縁を取りながら押しつけバネへ実装する必要があるが、この手間が非常に煩雑になり、現在の手法では実用的ではないことが判明したため、省力化、簡素化など、現在改良を検討している（⑨-図6参照）。

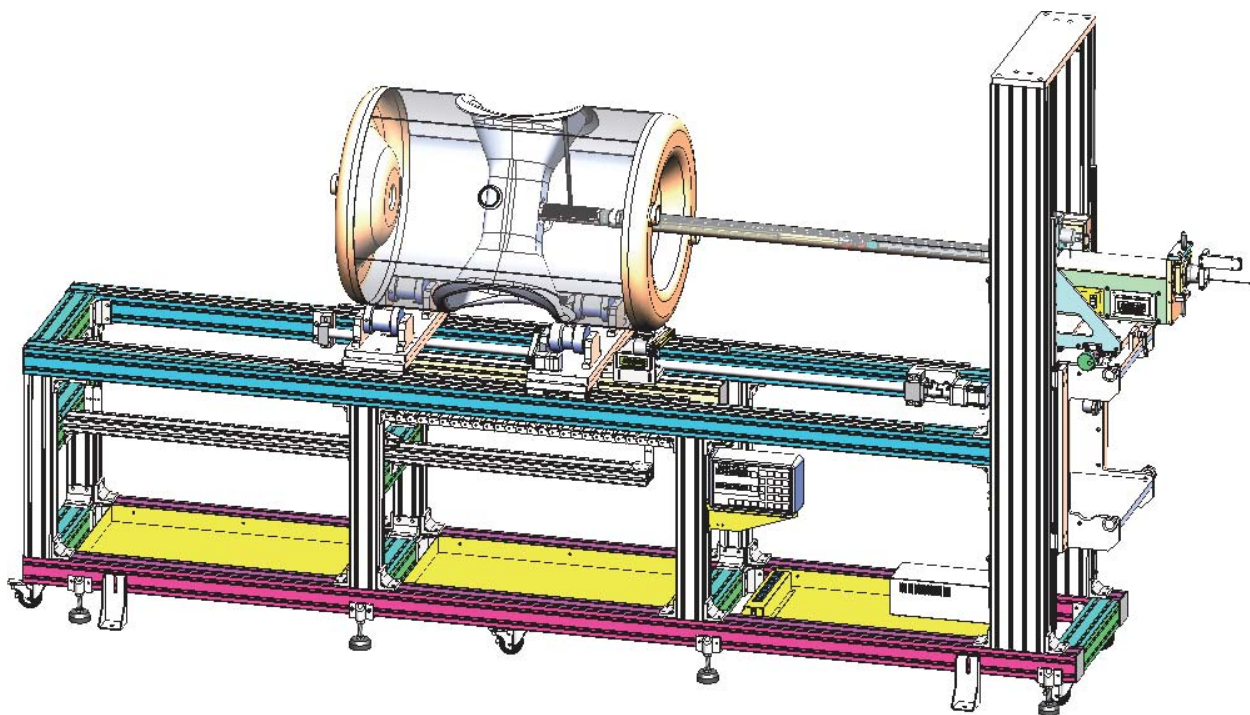


⑨-図5. MPの発生が予想される端版外周部に温度センサーを配置した様子

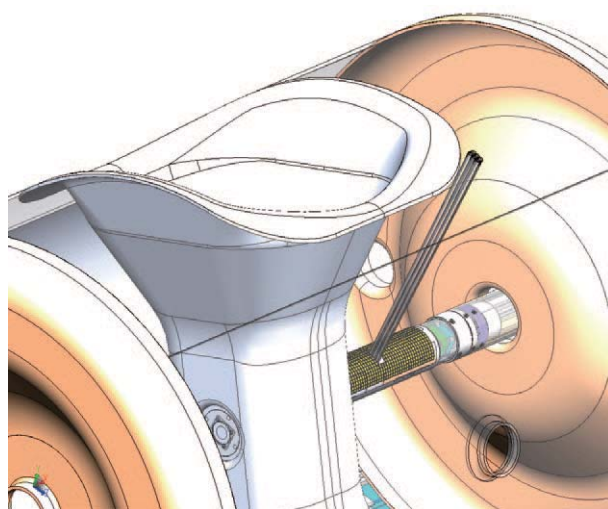


⑨-図6. 温度測定装置の試作

また、光学的表面検査の可能性の検討に着手した。325 MHz のスポーク空洞はビームホールの直径が楕円空洞と同程度なので、楕円空洞用の内面観察カメラを入れることが出来る（⑨-図7参照）。ただし、レンズ先端からの距離が伸びるため、より焦点距離の長いレンズを使う必要があり、かつ、分解能を下げざるを得ないが、カメラの視線の動作可能範囲からは、端板及びスポーク空洞の溶接線は観察可能である（⑨-図8参照）。



⑨-図7. 楕円空洞用の内面観察カメラの架台にスポーク空洞を乗せた状況



⑨-図8. 楕円空洞用の内面観察カメラで端板及びスポーク空洞の溶接線は観察可能。

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

独立行政法人産業技術総合研究所の S バンド小型リニアック施設の逆コンプトン散乱 X 線の実験用に、X 線 Talbot-Lau 干渉計用格子の準備を整えた。格子の評価は、十分な X 線量を確保できる実験室 X 線源を用い、従来の達成値と同等である約 35% の縞鮮明度が確認できた。ただし、独立行政法人産業技術総合研究所の S バンド小型リニアック施設の逆コンプトン散乱 X 線での実験は、格子周期や格子面積が異なるが、既存の格子を用いた初期実験を行い、特に X 線強度と露光時間に関する感触を確かめる実験を行った。モアレ縞発生は確認できたが、X 線強度が一般的なマイクフォローカス X 線源より約 4 桁低く、露光時間を画像一枚あたり 30 分としても、S/N の低い画像であった。この撮影時間中の格子の機械的ドリフト、および、カメラの暗電流や加速器からの高エネルギー制動放射 X 線によるノイズの影響が大きく、X 線位相イメージングとして、縞鮮明度、空間分解能、あるいは、屈折感度などの画質評価に供せない状況であった。同様に、逆コンプトン散乱 X 線の単色性の効果を示す視点においても、通常の実験室 X 線からの連続 X 線を用いた画質と比べると、現状の S/N では遠く不十分であった。

今後は産総研に加えて KEK で開発中の逆コンプトン散乱 X 線源を使い、X 線強度の問題が改善されれば、本格的な X 線位相イメージングを開始し、特に逆コンプトン散乱 X 線の単色性の特徴を活かした応用へとつなげたい。

⑩-1 独立行政法人産業技術総合研究所の S バンド小型リニアック施設における初期実験

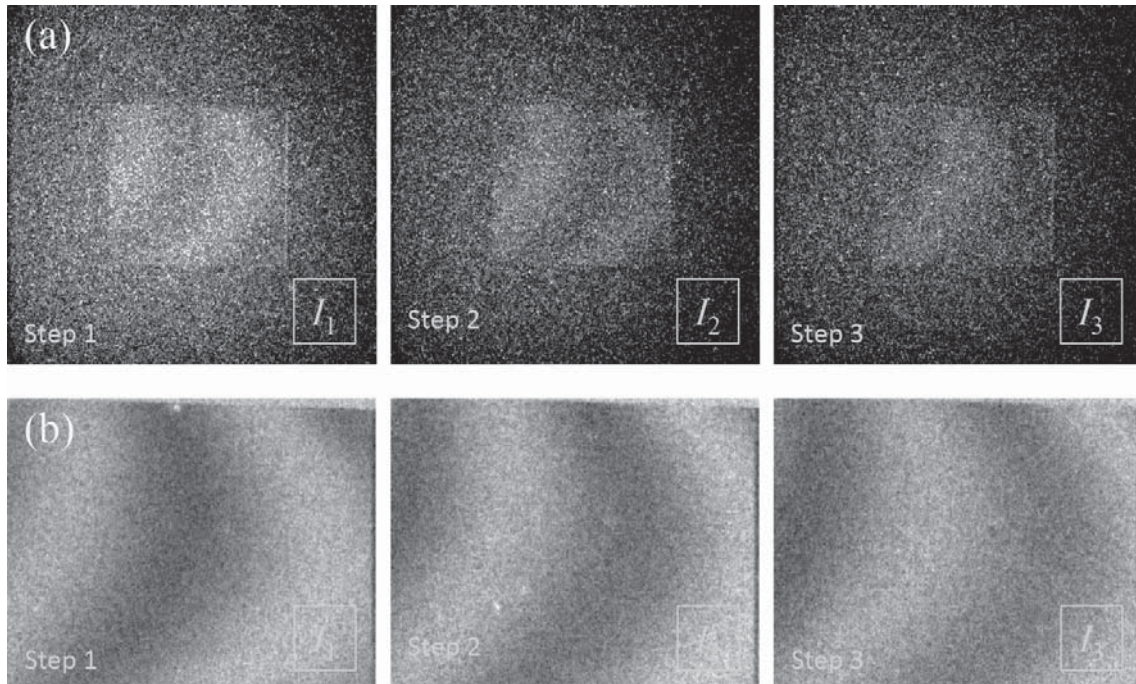
独立行政法人産業技術総合研究所の S バンド小型リニアック施設の逆コンプトン散乱 X 線を用いた位相イメージングを行うためには、X 線の空間的干渉性の大小に依存して、Talbot 干渉計か Talbot-Lau 干渉計の構成を選ばなければならない。X 線源サイズ（電子ビームとレーザーの衝突点サイズ）および衝突点から位相格子 (G1) までの距離を考えると、想定している 30 keV の X 線について、空間的可干渉距離が一般的な G1 の周期（数 μm ）より大幅に大きく、Talbot 干渉計を機能させることができない。そのため、Talbot 干渉計を構成する位相格子 (G1) と振幅格子 (G2) を平成 25 年度に製作していたが、加えてマルチスリット格子 (G0) を本年度に製作した。すなわち、G0, G1, G2 の三枚の格子を揃えて Talbot-Lau 干渉計を構成し、本格的な位相イメージング実験を開始することになる。これら格子の評価については次項で述べる。ここでは、上記格子が揃う前に着手した初期実験について報告する。

初期実験は、我々が既に所有している格子の組み合わせで、S バンド小型リニアック施設で利用可能な実験スペースを鑑み、本格実験にできるだけ近い構築可能な Talbot-Lau 干渉計構成を探したうえで、現時点で検討可能ないくつかの問題点について先行して検討を進めるために実施した。その際に準備した X 線格子とその配置について⑩-表 1 にまとめた。その他、X 線源などの装置上の詳細については、産総研からの報告（項目⑧）と重複するので省略する。

⑩-表 1. 初期実験のために準備した X 線 Talbot-Lau 干渉計用格子

構成	G0 周期 (μm)	G1 周期 (μm)	G2 周期 (μm)	G0-G1 距離 (m)	デザインエネルギー (keV)	備考
(1)	22.7	4.36	5.4	1.24	25	
(2)	30	4.5	5.3	1.14	17.8	最大視野 5 mm

このうち、(2)の構成による撮影結果を⑩-図 1 に示す。X 線 Talbot-Lau 干渉計による位相イメージングでは、格子のひとつを並進させて複数のモアレ画像を取得する（縞走査法）。本実験では、格子をその周期の 1/3 ずつ並進させ、3 枚のモアレ画像を取得した。図 1 (a) は、X 線 CCD カメラ（産総研所有）を G2 格子の背後に設置して撮影したものであり、格子を並進して得られたモアレ画像を並べて示した。試料は通常 G1 の上流に配置するが、ここでは X 線 Talbot-Lau 干渉計の動作確認のため、試料は置いていない。G0 格子のサイズ制限のために視野は限られ、図 1 (a) の中央の横幅 5 mm の範囲でモアレ縞が確認できる。図 1 (b) は、検出器をイメージングプレートに置き換えて撮影し、視野にあたる領域のみを並べて示したものである。図 1 (a) ではモアレ縞の鮮明度が約 7% であったのに対し、図 1 (b) では約 28% であった。この違いは、検出器のスペクトル感度が影響していると考えられる。X 線 CCD カメラのシンチレータの仕様 (GOS, 300 μm) により、図 1 (a) においては、位相イメージングへの寄与が少ない高エネルギー X 線成分のかぶりが多かったと思われる。高エネルギー X 線成分の起源は制動放射による逆コンプトン散乱 X 線とは異なるものと考えられる。実際、スパイク上のノイズが図 1 (a) に多く見られ、これへの対処が逆コンプトン散乱 X 線を用いた位相イメージング実験において重要となるであろう。いずれにしても、IP による 28% の数値であっても、同じ格子を我々の実験室にてタングステンターゲットからの連続 X 線を用いた実験で 35% 程度のモアレ縞鮮明度が得られるので、十分な性能が確認できたとはいえない。ここに示したモアレ画像を撮影するために、一枚当たり 30 分の露光時間を設定したので、この露光時間中の機械的なドリフト、および振動の影響も危惧される。



⑩-図 1. 格子を並進させて計測されたモアレ画像。(a) X線 CCD カメラ使用、(b) イメージングプレート使用。

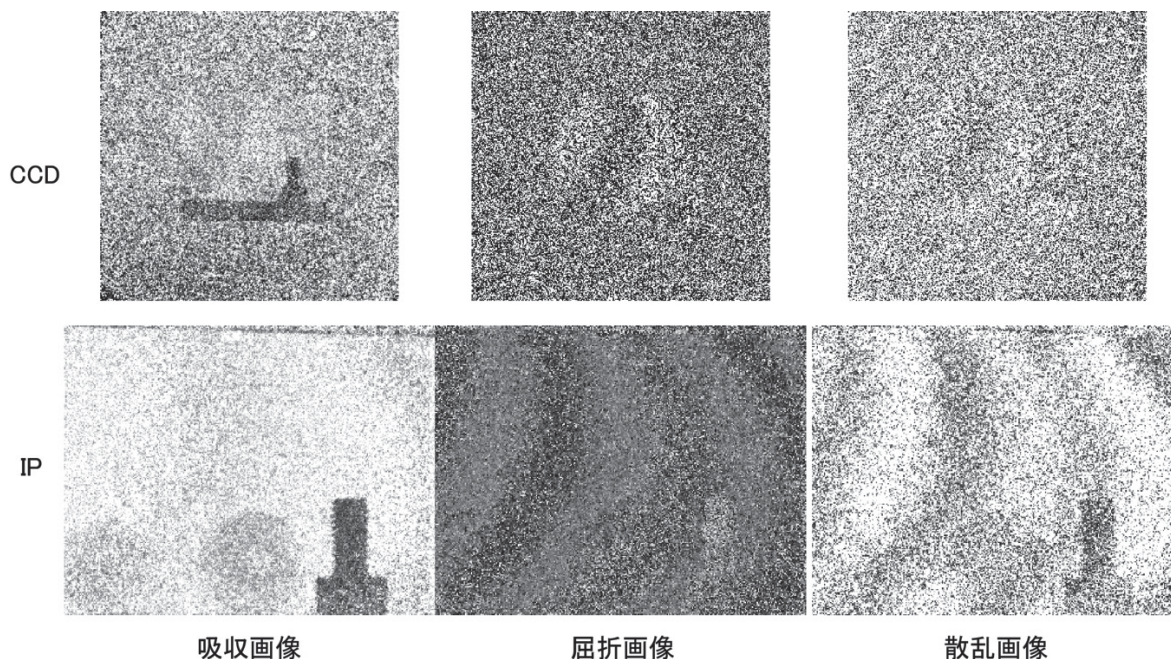
モアレ画像は、縞走査法による演算処理を経て、吸収画像、屈折画像、および、散乱画像として変換出力される。それぞれの演算処理とは、

$$\text{吸収像} = \frac{\sum_k I_k}{\sum_k I_k^0} = I_{abs}$$

$$\text{屈折像} = \arg \left[\frac{\sum_{k=1}^M I_k \exp\left(-i2\pi \frac{k}{M}\right)}{\sum_{k=1}^M I_k^0 \exp\left(-i2\pi \frac{k}{M}\right)} \right]$$

$$\text{散乱像} = \frac{\sum_{k=1}^M I_k \exp\left(-i2\pi \frac{k}{M}\right)}{\sum_{k=1}^M I_k^0 \exp\left(-i2\pi \frac{k}{M}\right)} \cdot I_{abs}$$

であり、 I_k は k 番目のモアレ画像を示す。また、 I_k^0 は試料がないときの画像を指す。今回の実験では 3 ステップの縞走査を行ったので、 $k = 1, 2, 3$ である。図 2 に今回の結果を示した。テスト試料としては、プラスチック球を用いた。画像右側には、マーカーとして SUS のねじを並べて設置した。このように、画質としてはかなり悪く、位相イメージングとしてはほぼ機能していないことが結論される。



⑩-図 2. 縞走査法によるモアレ画像からの吸収画像、屈折画像、および、散乱画像の演算結果。上段は X 線 CCD カメラによる画像を使用、下段はイメージングプレートによる画像を使用。

以上の結果から指摘できる問題として、以下の三つが強調される。

問題点 1: X 線強度の不足。30 分の露光でも検出される X 線強度が不十分であり、位相イメージングとして必要な S/N が確保できていない。

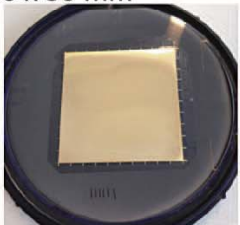
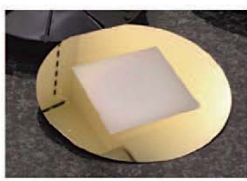

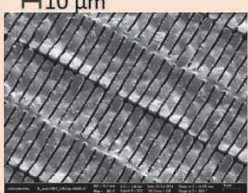
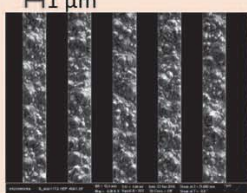
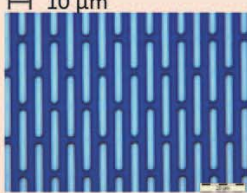
問題点 2: 装置の安定性: 図 2 の屈折画像や散乱画像をみると、もともとのモアレ縞の痕跡が現れている。格子を周期の 1/3 ずつ並進させたので、理想的にはモアレ縞もその周期の 1/3 ずつ動いた形で画像が記録されるはずであるが、図 1 を観察しても、そのようには見て取れず、縞走査中にドリフトがあったことが明確である。これがモアレ縞痕跡のエラーとして現れたと判断できる。これは、問題点 1 で指摘した露光時間が長いことも影響している。

問題点 3: 制動放射による高エネルギー X 線の影響: 逆コンプトン散乱 X 線では加速器からの制動放射がバックグラウンドノイズとしてかぶってくることは原理的に避けられないが、逆コンプトン散乱 X 線強度が相対的にまだ弱いため、バックグラウンドのノイズが大きく影響した。レーザー側の強度および繰り返しの増強によりこれは今後改善されると期待される。

⑩-2 X 線格子の評価

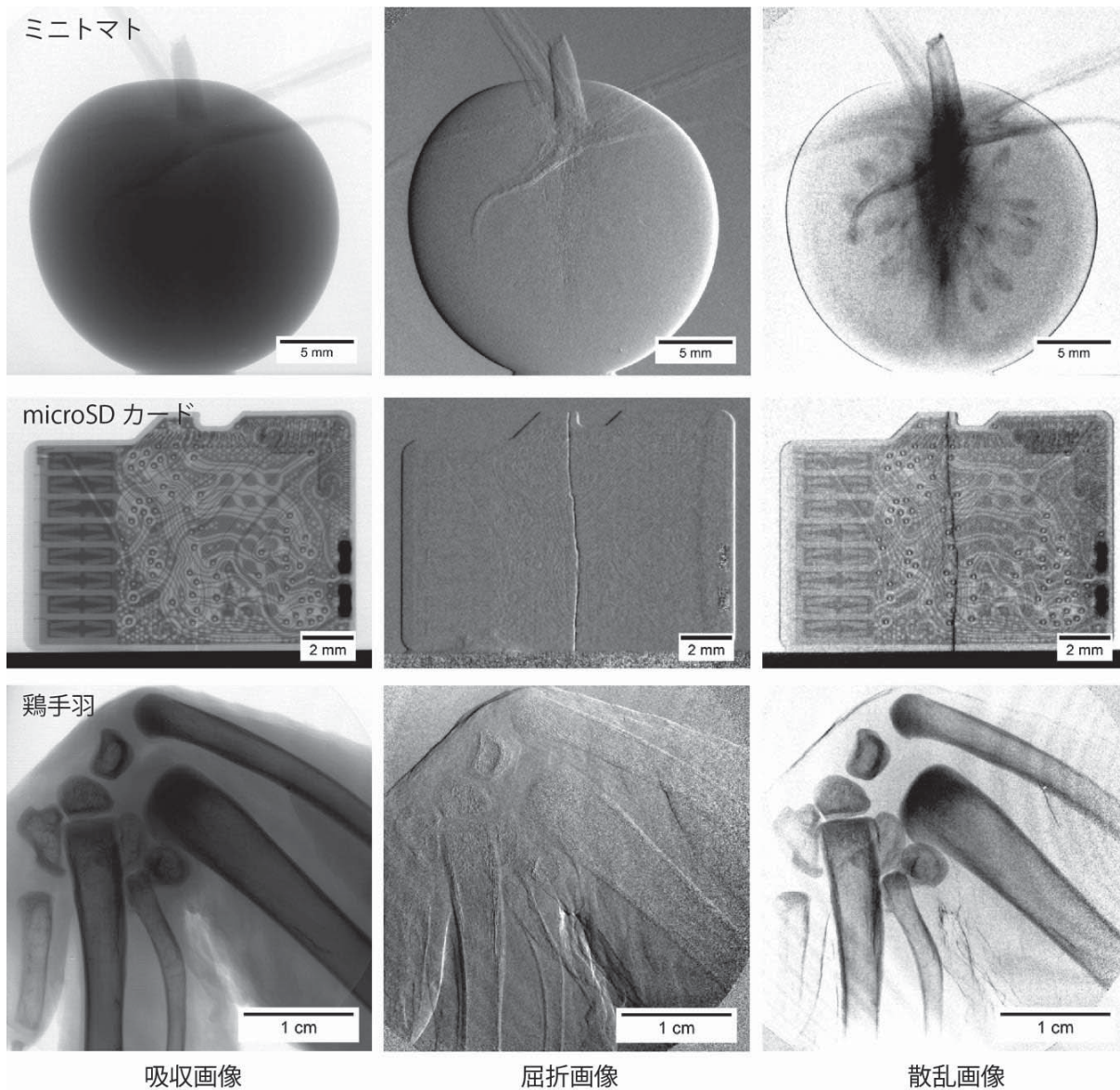
X 線 Talbot-Lau 干渉計を構成するために製作した X 線格子を図 3 に示す (G1,G2 は平成 25 年度に製作済み)。30 keV の X 線に対して最適となるように設計した。この格子を用いた産総研における逆コンプトン散乱 X 線を用いた実験は、レーザーの故障などのためにスケジュールすることができず、我々の実験室にて浜松ホトニクス製のマイクロフォーカス X 線源を用いた予備実験を行った。X 線源はタングステンターゲットを有し、フォーカスサイズ 0.3 mm (ラージフォーカスモード)、管電圧 50 kV、管電流 300 μ A で運転した。画像検出器には、40 μ m の GOS シンチレータと 2:1 ファイバーカップリングを有する CCD カメラ (実効画素サイズ

18 μm) を用いた。G1 は 30 keV の X 線に最適となる設計としたが、事前の評価では 25 keV の X 線に対するほうが高いモアレ縞鮮明度を示したので、本実験では 25 keV 最適配置とした。すなわち、G0-G1 距離を 245.5 mm、G1-G2 距離を 269.5 mm とした。なお、位相格子の最適エネルギーは格子パターンの厚さによるが、ここに誤差がある可能性がある。これについては、格子の再製作を進めている。

Grating Type	Source Grating, G0	Phase Grating, G1 $\pi/2$ phase shift at 30 keV	Analyzer Grating, G2
Material	Au	Ni	Au
Period (μm)	6.82	3.57	7.49
Structure Height (μm)	Design: 70 Measured: $>70 \pm 10\%$	Design: 5.23 Measured: 5.34 ± 0.35	Design: 100 Measured: 103
Grating on 4-inch Si wafer	50 x 50 mm ² 	50 x 50 mm ² 	Diameter: 70mm 
Structures	H10 μm  SEM	H1 μm  SEM	H 10 μm 

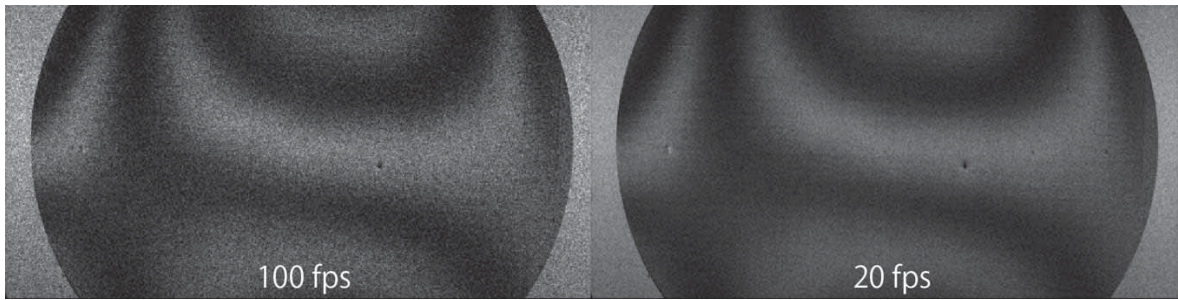
⑩-図 3. 逆コンプトン散乱 X 線を用いた位相イメージングのための Talbot-Lau 干渉計を構成する専用 X 線格子。30 keV の X 線に対して最適となるように設計した。

図 4 は上記の構成で位相イメージングを行った結果である。ここでは、5 ステップの縞走査を行い、モアレ画像一枚あたりの露光時間は 30 秒である。図の上段から、ミニトマト、microSD カード（クラック有）、および、鶏手羽の撮影例である。それぞれ、吸収画像、屈折画像、散乱画像を示した。吸収画像は従来の X 線減衰による画像であり、屈折画像は、試料による僅かな屈折による X 線進行方向の変化（水平方向成分）を示す画像、さらに、散乱画像は、試料における極小角 X 線散乱による縞鮮明度の低下（言い換えれば、デコヒーレンス）を表したものである。ミニトマトの撮影では、特に散乱画像において内部の繊維構造がよく描出される特徴が注目される。microSD カードは、故意にクラックが入っているものであるが、クラックが屈折画像と散乱画像でよく検知できている。鶏手羽の撮影では、屈折画像に軟骨が捉えられている。これらは、我々の研究室において従来から行ってきた X 線位相イメージングの画質と変わりなく、準備した格子セットに特段の問題はないことが確認できた。



⑩-図4. 図3で示した格子セットによるX線 Talbot-Lau 干渉計を東北大学百生研究室の既存装置に設置して撮影したミニトマト、microSD カード、鶏手羽の画像。

同じ格子セットを非破壊検査応用のために別途開発中の装置にも装着してテストした。この装置では、(株)リガクの陽極回転型 X 線源 (タンダステンターゲット、40 kV、40 mA)、および、X 線光子直接計数型の画像検出器 (HyPix-3000) を搭載しており、モアレ画像の動画撮影が可能となっている。図5には 100 fps と 20 fps の動画像からフレームを抜き出して示した。ここでも、この格子セットは十分な性能を有していることを確認した。



⑩-図 5. 図 3 で示した格子セットによる X 線 Talbot-Lau 干渉計を東北大学百生研究室で別途開発中の位相敏感スキャナ（リガク、X 線光子直接計数型の画像検出器（HyPix-3000）搭載）に装着して撮影したモアレ画像の動画像（100 fps および 20 fps）の一部。

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・調整を行うとともに、課題間の連携強化、研究者間の交流促進を図った。そのために、本課題全体打合せ（以下、「全体会議」という。）を2ヶ月に1度、各参画機関持ち回りで行った（⑪-表1）。主に各参画機関の研究開発状況報告と計画に関する意見交換および参画機関間の協力に関する調整を行った。また、本研究課題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こととした。

⑪-表 1. 平成 26 年度に実施した全体会議

日時	場所		
平成26年 4月16日	第6回全体会議	(株)リガク	東京工場セミナーホール
平成26年 7月 1日	第7回全体会議	日本大学	船橋公舎テクノブレース 15
平成26年 9月30日	第8回全体会議	JAEA	原子力科学研究所
平成26年12月24日	第9回全体会議	産業技術総合研究所	2-12 棟 2 階第 6 会議室
平成27年 3月 5日	第10回全体会議	KEK	2号館 1階会議室大

全体会議での報告等は、本研究課題ホームページ（<http://nkoctrack.kek.jp/>）から閲覧可能である。また、本研究課題に関連した学会・研究会などの報告も、同ホームページに年度毎に整理し、関係者が常に関連情報を閲覧できるようにした。

上記以外に 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。

打ち合わせ・研究会

平成26年 6月24日	量子ビームレーザー打合せ	KEK 1号館1階談話室2
平成26年 9月29日	量子ビームレーザー打合せ	KEK 3号館1階会議室
平成26年12月 1日	量子ビームレーザー打合せ	KEK 1号館1階談話室1
平成27年 2月18日	量子ビームレーザー打合せ	KEK 2号館1階会議室中

平成26年 4月 3日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年 4月10日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年 4月17日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年 4月24日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年 5月 1日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年 5月 8日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年 5月29日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年 6月12日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年 6月26日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ

平成26年 7月 3日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年 7月10日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年 7月17日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年 7月24日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年 7月31日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年 8月 7日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年 8月21日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年 9月11日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年 9月25日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年10月23日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年10月30日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年11月 6日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年11月13日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年11月20日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年11月27日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年12月 4日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年12月11日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成26年12月18日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成27年 1月 8日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成27年 1月15日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成27年 1月22日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成27年 1月29日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成27年 2月 5日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成27年 2月12日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成27年 3月12日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ
平成27年 3月26日	小型X線源実験打合せ(LUCX Meeting)	KEK-LCコンテナ

平成26年 9月23日	超伝導空洞打ち合わせ	トーマス・ジェファークソン国立加速器施設
平成26年 9月24日	超伝導空洞打ち合わせ	トーマス・ジェファークソン国立加速器施設
平成26年 9月26日	超伝導空洞視察	ミシガン州立大学(アメリカ・ミシガン州) 国立超伝導サイクロトロン研究所
平成26年 8月19日	加速器空洞研究打合わせ	KEK-京都大学-JAEA(ネット会議)
平成26年11月19日	加速器空洞研究打合わせ	KEK 1号館談話室
平成26年12月 2日	加速器空洞研究打合わせ	KEK-京都大学-JAEA(ネット会議)
平成27年 1月13日	加速器空洞研究打合わせ	KEK-京都大学-JAEA(ネット会議)
平成27年 2月 5日	加速器空洞研究打合わせ	KEK-京都大学-JAEA(ネット会議)
平成26年 4月14日	cERL-LCLS打ち合わせ	KEK 4号館2階輪講室
平成26年 4月23日	cERL-LCLS打ち合わせ	KEK 4号館2階244室

平成26年 7月 8日	cERL-LCLS打ち合わせ	KEK 2号館4階会議室
平成26年 7月25日	cERL建設打ち合わせ	KEK 3号館7階会議室
平成26年 8月22日	cERL建設打ち合わせ	KEK 3号館5階会議室
平成26年11月12日	ビームダイナミクス打ち合わせ	PF研究棟2階会議室
平成27年 2月 9日	コミッシュヨニング打ち合わせ	cERL開発棟2階会議室
平成27年 2月13日	コミッシュヨニング打ち合わせ	cERL開発棟2階会議室
平成27年 3月 6日	コミッシュヨニング打ち合わせ	cERL開発棟2階会議室
平成27年 3月 9日	コミッシュヨニング打ち合わせ	cERL開発棟2階会議室
平成27年 3月13日	コミッシュヨニング打ち合わせ	cERL開発棟2階会議室
平成27年 3月17日	コミッシュヨニング打ち合わせ	cERL開発棟2階会議室

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	発表場所 (学会等名)	発表時期	国内・外 の別	本委託費の成果か ○:ほぼ全て △:一部
CST simulations of the Smith-Purcell radiation from a lamellar grating in the sub-THz frequency region. (口頭)	K. Lekomtsev	III Mini-workshop for advanced generation of THz and Compton X-ray beams "AGTAX", MEPHI, Russia	平成26年5月	国外	○
LUCX - THz Program: Overview and Prospects (口頭)	A. Aryshev, M. Shevelev, Y. Honda, J. Urakawa	III Workshop AGTaX Advanced Generation of THz and Compton X-ray beams using compact electron accelerator (MEPHI, Russia)	平成26年5月	国外	△
Coherent Radiation Spectrum Measurements at KEK LUCX facility: present status and future plan (口頭)	M. Shevelev	III Workshop AGTaX Advanced Generation of THz and Compton X-ray beams using compact electron accelerator (MEPHI, Russia)	平成26年5月	国外	○
Development of an optical resonant cavity for the LCS experiment at cERL (ポスター)	赤木 智哉	IPAC14 (Dresden, Germany)	平成26年6月	国外	○
Review of the multilayer coating model (ポスター)	Takayuki Kubo, Yoshihisa Iwashita, Takayuki Seaki	IPAC14 (Dresden, Germany)	平成26年6月	国外	△
Two-dimensional models of the magnetic-field enhancement at pit and bumps (ポスター)	Takayuki Kubo	IPAC14 (Dresden, Germany)	平成26年6月	国外	△
In-house production of a large-grain single-cell cavity at Cavity Fabrication Facility and results of performance tests (ポスター)	Takayuki Kubo, Yasuo Ajima, Hitoshi Inoue, Kensei Umemori, Yuichi Watanabe, Masashi Yamanaka	IPAC14 (Dresden, Germany)	平成26年6月	国外	△
Multi-Alkali Photo-cathode R&D (ポスター)	清宮 裕史	IPAC14 (Dresden, Germany)	平成26年6月	国外	○
A Study of Robustness of NEA-GaAs Photo-cathode (ポスター)	K. Uchida, M. Kuriki, Y. Seimiya, R. Kaku, K. Miyoshi, N. Yamamoto	IPAC14 (Dresden, Germany)	平成26年6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	発表場所 (学会等名)	発表時期	国内・外 の別	本委託費の成果か ○:ほぼ全て △:一部
MULTIPACTOR SIMULATION ON SUPERCONDUCTING SPOKE CAVITY FOR LASER COMPTON SCATTERED PHOTON SOURCES (ポスター)	岩下 芳久、 藤澤 博、 頓宮 拓、 羽島 良一、 永井 良治、 沢村 勝	IPAC14 (Dresden, Germany)	平成26年6月	国外	○
DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING SPOKE CAVITY FOR LASER COMPTON SCATTERED PHOTON SOURCES (ポスター)	沢村 勝、 羽島 良一、 永井 良治、 久保 毅幸、 藤澤 博、 岩下 芳久	IPAC14 (Dresden, Germany)	平成26年6月	国外	○
Basic Design of a 20 K C-band 2.6-cell Photocathode RF Gun (ポスター)	T. Tanaka, M. Inagaki, K. Nakao, K. Nogami, T. Sakai, M. Fukuda, T. Takatomi, J. Urakawa, M. Yoshida, T. Shintomi	IPAC14 (Dresden, Germany)	平成26年6月	国外	○
Superconducting nano-layer coating without insulator (ポスター)	Takayuki Kubo	LINAC14 (Geneva, Switzerland)	平成26年8月	国外	△
Vortex-penetration field at a groove with a depth smaller than the penetration depth (ポスター)	Takayuki Kubo	LINAC14 (Geneva, Switzerland)	平成26年8月	国外	○
DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING SPOKE CAVITY FOR ELECTRON ACCELERATORS (ポスター)	久保 毅幸、 佐伯 学行、 Cenni, E.、 藤澤 博、 岩下 芳久、 頓宮 拓、 羽島 良一、 沢村 勝	LINAC14 (Geneva, Switzerland)	平成26年8月	国外	○
Toward High-Power Storage and High-Enhancement Factor (口頭)	上杉 祐貴	POSIPOL 2014 (岩手県一関市)	平成26年8月	国内	○
ATF Compton Status (口頭)	高橋 徹	POSIPOL 2014 (岩手県一関市)	平成26年8月	国内	○
cERLでのレーザーコンプ トン散乱実験用光共振器の 開発 (ポスター)	赤木 智哉	第11回日本加速器学会年会 (青森県)	平成26年8月	国内	○
KEK小型電子加速器 (LUCX)の現状報告(7) (ポスター)	福田 将史	第11回日本加速器学会年会 (青森県)	平成26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	発表場所 (学会等名)	発表時期	国内・外 の別	本委託費の成果か ○:ほぼ全て △:一部
電子加速用超伝導スポーク 空洞におけるマルチパク タ・シミュレーション (口頭)	久保 毅幸、 チェンニ エンリコ、 羽島 良一、 岩下 芳久、 佐伯 学行、 沢村 勝、 頓宮 拓	第11回日本加速器学会年会 (青森県)	平成26年8月	国内	○
マルチアルカリ高量子効 率・高耐久フォトカソード の研究(口頭)	清宮 裕史	第11回日本加速器学会年会 (青森県)	平成26年8月	国内	○
高耐久NEAフォトカソー ドの研究(口頭)	内田 和秀	第11回日本加速器学会年会 (青森県)	平成26年8月	国内	△
ERL 超伝導スポーク空洞 開発の現状(ポスター)	沢村 勝、 永井 良治、 西森 信行、 羽島 良一、 岩下 芳久、 藤澤 博、 頓宮 拓、 久保 毅幸	第11回日本加速器学会年会 (青森県)	平成26年8月	国内	○
大電流電子源のための光陰 極準備システムの開発 (ポスター)	西森 信行、 永井 良治、 松葉 俊哉、 沢村 勝、 羽島 良一	第11回日本加速器学会年会 (青森県)	平成26年8月	国内	○
クライオ光陰極高周波電子 銃用試験空洞の高周波特性 (ポスター)	境 武志、 田中 俊成、 中尾 圭佐、 野上 杏子、 稲垣 学、 高塚 健人、 長島 涼子、 早川 建、 早川 恭史、 高富 俊和、 福田 将史、 新富 孝和、 浦川 順治、 吉田 光宏	第11回日本加速器学会年会 (青森県)	平成26年8月	国内	○
NLPR法を用いたモード同 期Ybファイバーレーザー の開発(ポスター)	鈴木 里佳	第11回日本加速器学会年会 (青森県)	平成26年8月	国内	○
超伝導加速空洞の欠陥検査 システム XT-map の開発 (ポスター)	頓宮 拓	第11回日本加速器学会年会 (青森県)	平成26年8月	国内	△
電子加速用超伝導スポーク 空洞におけるマルチパク タ・シミュレーション (ポスター)	久保 毅幸	第11回日本加速器学会年会 (青森県)	平成26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	発表場所 (学会等名)	発表時期	国内・外 の別	本委託費の成果か ○:ほぼ全て △:一部
RF Characteristics of 20 K Cryogenic 2.6-cell Photocathode RF-gun Test Cavity (ポスター)	Takeshi Sakai, Manabu Inagaki, Keisuke Nakao, Kyoko Nogami, Toshinari Tanaka, Masafumi Fukuda, Toshikazu Takatomi, Junji Urakawa, Mitsuhiro Yoshida, Takakazu Shintomi	LINAC14 (Geneva, Switzerland)	平成26年9月	国外	○
X-ray Talbot Interferometry Using a Laser Compton Scattering X-ray Source (ポスター)	Margie P. Olbinado, Yoshitaka Taira, Masato Yasumoto, Kazuyuki Sakaue, Ryunosuke Kuroda, Atsushi Momose	第75回応用物理学会秋季学 術講演会	平成26年9月	国内	○
LCS 光源のための超伝導 スポーク空洞開発の現状 (口頭)	沢村 勝、 永井 良治、 西森 信行、 羽島 良一、 岩下芳久、 久保 毅幸	日本原子力学会(京都府)	平成26年9月	国内	○
偏極陽電子源の為にレー ザー蓄積共振器の高Finesse 化への取り組み (口頭)	田中 龍太	日本物理学会 2014年秋季大会(佐賀県)	平成26年9月	国内	△
Pol. e+ source based on Compton scattering with FEL & 4 mirror cavity (口頭)	Junji Urakawa, Alexander Potylitsyn	AGTaX (St. Petersburg, Russia)	平成26年10 月	国外	△
CST Simulations of THz Smith-Purcell radiation from a lamellar grating with vacuum gaps. (ポスター)	K. Lekomtsev	Channeling2014 (Capri-Naples, Italy)	平成26年10 月	国外	○
Radiation from cylindrical target:Progress report on theory and CST simulations (口頭)	A.A.Ponomarenko, K. Lekomtsev	IV Mini-workshop for advanced generation of THz and Compton X-ray beams "AGTAX"(Oxford, UK)	平成26年10 月	国外	△
Pol. e+ source based on Compton scattering with FEL & 4 mirror cavity (口頭)	Junji Urakawa, Alexander Potylitsyn	LCWS2014 (Belgrade, Serbia)	平成26年10 月	国外	△
ATF laser-Compton status (口頭)	上杉 祐貴	LCWS2014 (Belgrade, Serbia)	平成26年10 月	国外	○
LUCX - THz Program: Overview and Prospects (口頭)	A. Aryshev, M. Shevelev, Y. Honda, J. Urakawa	V Workshop AGTaX Advanced Generation of THz and Compton X-ray beams using compact electron accelerator (SPbSU, Russia)	平成26年10 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	発表場所 (学会等名)	発表時期	国内・外 の別	本委託費の成果か ○:ほぼ全て △:一部
GaAs cathode activation with CsTe thin film (口頭)	栗木 雅夫	Photocathode Physics WS (Berkeley, CA, US)	平成26年11 月	国外	△
High-Q超伝導空洞(口頭)	久保 毅幸	ビーム物理研究会2014 (京都府)	平成26年11 月	国内	○
フェムト秒ファイバレー ザー用の増幅システムの開 発(ポスター)	添田 雄史	ビーム物理研究会2014 (京都府)	平成26年11 月	国内	○
早稲田大学における高周 波電子銃開発と応用～これ までとこれから～(口頭)	坂上 和之	ビーム物理研究会2014 (京都府)	平成26年11 月	国内	△
高Q値超伝導加速空洞の研 究(口頭)	久保 毅幸	第39回技術部会及び第27回 大型プロジェクト研究部会 (東京都)	平成26年11 月	国内	○
FEL Compton scheme for Pol. e+ source with 4 mirror optical cavity(口頭)	Junji Urakawa	Cavity Compton Collaboration Meeting (Paris, France)	平成26年12 月	国外	△
Enhancement cavity laser- Compton experiences in KEK(口頭)	Junji Urakawa	MPQ2014 (Munich, Germany)	平成26年12 月	国外	○
Field limit and nano-defects covering material surface (口頭)	Takayuki Kubo	TTC (TESLA Technology Collaboration) meeting (茨城県つくば市)	平成26年12 月	国内	△
Multipactor simulation of 325 MHz superconducting spoke cavity(口頭)	T. Kubo, E. Cenni, H. Fujisawa, R. Hajima, Y. Iwashita, T. Saeki, M. Sawamura, H. Tongu	TTC (TESLA Technology Collaboration) meeting (茨城県つくば市)	平成26年12 月	国内	○
Development of superconducting spoke cavity for electron accelerator in Japan(口頭)	沢村 勝、 羽島 良一、 永井 良治、 西森 信行、 久保 毅幸、 佐伯 学行、 Cenni, E.、 藤澤 博、 岩下 芳久、 頓宮 拓	TTC (TESLA Technology Collaboration) meeting (茨城県つくば市)	平成26年12 月	国内	○
Development of a compact X-ray source via laser- Compton scattering(口頭)	坂上 和之	AFAD2015 (Hsinchu, Taiwan)	平成27年1月	国外	○
コンパクトERLでのレー ザーコンプトン散乱ガンマ 線発生用高出力・高繰り返し レーザーの開発(口頭)	小菅 淳	レーザー学会学術講演会 第35回年次大会(東京都)	平成27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	発表場所 (学会等名)	発表時期	国内・外 の別	本委託費の成果か ○:ほぼ全て △:一部
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線源の開発(口頭)	福田 将史	第12回高輝度高周波電子銃研究会(東京都)	平成27年1月	国内	○
2.6セルクライオ光陰極高周波電子銃試験空洞の冷却試験(口頭)	境 武志	第12回高輝度高周波電子銃研究会(東京都)	平成27年1月	国内	○
Grating Interferometry using a Linac-based Laser Compton X-ray Source (ポスター)	Margie P. Olbinado, Yoshitaka Taira, Masato Yasumoto, Kazuyuki Sakaue, Ryunosuke Kuroda, Atsushi Momose	第28回日本放射光学会(滋賀県)	平成27年1月	国内	○
Issues with diagnostic systems in electron accelerators (口頭)	A. Aryshev	Indo-Japan school on Advanced Accelerators of Ions and Electrons (New Delhi, India)	平成27年2月	国外	△
LUCX - THz Program: Overview and Prospects (口頭)	A. Aryshev	Indo-Japan school on Advanced Accelerators of Ions and Electrons (New Delhi, India)	平成27年2月	国外	△
Recent Activities for photon beam generation at KEK based on Inverse Compton (口頭)	Junji Urakawa	JSPS-DST Special Lecture Tour Program (New Delhi, India)	平成27年2月	国外	○
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(口頭)	浦川 順治	早稲田大学特別セミナー(東京都)	平成27年2月	国内	○
Enhancement cavity laser-Compton experiences in KEK (口頭)	Junji Urakawa	V Workshop AGTaX Advanced Generation of THz and Compton X-ray beams using compact electron accelerator (Oxford, UK)	平成27年3月	国外	○
Progress towards compact pre-bunched FEL realization (口頭)	A. Aryshev, M. Shevelev, Y. Honda, N. Terunuma	V Workshop AGTaX Advanced Generation of THz and Compton X-ray beams using compact electron accelerator (Oxford, UK)	平成27年3月	国外	△
SOI技術を用いた放射線イメージセンサーの最近の進展(口頭)	三好 敏喜	第15回応用物理学会(神奈川県、平塚市)	平成27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(16)(口頭)	福田 将史	日本物理学会第70回年次大会(東京都)	平成27年3月	国内	○
SOI技術を用いたX線イメージセンサー開発の最近の進展(口頭)	三好 敏喜	日本物理学会第70回年次大会(東京都)	平成27年3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	発表場所 (学会等名)	発表時期	国内・外 の別	本委託費の成果か ○:ほぼ全て △:一部
マルチアルカリフォトカ ソードの寿命特性評価 (口頭)	横田 温貴	日本物理学会 第70回年次大会(東京都)	平成27年3月	国内	○
Cs-Te薄膜によるGaAsカ ソード活性化(口頭)	栗木 雅夫	日本物理学会 第70回年次大会(東京都)	平成27年3月	国内	△
2.6セルクライオ光陰極高 周波電子銃用試験空洞の低 温特性(口頭)	境 武志、 田中 俊成、 中尾 圭佐、 野上 杏子、 稲垣 学、 吉田 光宏、 高富 俊和、 浦川 順治、 新富 孝和	日本物理学会 第70回年次大会(東京都)	平成27年3月	国内	○
モード同期Ybファイバー レーザーを用いた光陰極用 レーザーシステムの開発 (口頭)	鈴木 里佳	日本物理学会 第70回年次大会(東京都)	平成27年3月	国内	○
光共振器を用いたパルス レーザーの繰り返し通倍化 に関する研究(口頭)	小林 岳周	日本物理学会 第70回年次大会(東京都)	平成27年3月	国内	○

2.3.2 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文名	発表者氏名	掲載誌名	発表時期	国内・外 の別	本委託費の成果か ○:ほぼ全て △:一部
Spectral properties of Compton inverse radiation: Application of Compton beams	Eugene Bulyak, Junji Urakawa	Journal of Physics: Conference Series 517 (2014) 012001 doi:10.1088/1742-6 596/517/1/012001	平成26年5月	国外	○
Sub-micrometer transverse beam size diagnostics using optical transition radiation	K. Kruchinin, A. Aryshev, P. Karataev, B. Bolzon, T. Lefevre, S. Mazzoni, M. Shevelev, S. Boogert, L. J. Nevay, N. Terunuma, J. Urakawa	Journal of Physics: Conference Series 517 (2014) 012011 doi:10.1088/1742-6 596/517/1/012011	平成26年5月	国外	○
Development of a 4-mirror optical cavity for an inverse Compton scattering experiment in the STF	Hirota Shimizu, Alexander Aryshev, Yasuo Higashi, Yosuke Honda, Junji Urakawa	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A745 (2014) 63–72	平成26年5月	国外	△
Simulations of Transition Radiation from a Flat Target using CST Particle Studio	K. Lekomtsev, A. Aryshev, P. Karataev, M. Shevelev, A. Tishchenko, J. Urakawa	Journal of Physics Conference Series 05- 2014; 517(1):012016	平成26年5月	国外	○
SOI monolithic pixel detector	T. Miyoshi, M. Ahmed, Y. Arai, Y. Fujita, Y. Ikemoto, A. Takeda, K. Tauchi	J. of Instrumentation, JINST_095P_1213, 2014, doi:10.1088/1748-0 221/9/05/C05044	平成26年5月	国外	△
Feasibility of Double Diffraction Radiation Target Interferometry for Compact Linear Accelerator Micro-train Bunch Spacing Diagnostics	D. Shkitov, A. Potylitsyn, A. Aryshev, J. Urakawa,	Journal of Physics Conference Series 05- 2014; 517(1):012024	平成26年5月	国外	△
Laserwire at the Accelerator Test Facility 2 with submicrometer resolution	L. J. Nevay, S. T. Boogert, P. Karataev, K. Kruchinin, L. Corner, D. F. Howell, R. Walczak, A. Aryshev, J. Urakawa, N. Terunuma	Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 072802 (2014)	平成26年7月	国外	△
Design of a two-cell rf-deflector cavity for ultra-short electron bunch measurement	Y. Nishimura, K. Sakaue, M. Nishiyama, T. Takahashi, M. Washio, T. Takatomi, J. Urakawa	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A764 (2014) 291–298	平成26年8月	国外	△
Observation of the stimulated coherent diffraction radiation in an open resonator at LUCX facility	A. Aryshev, S. Araki, M. Fukuda, P. Karataev, A. Konkov, G. Naumenko, A. Potylitsyn, K. Sakaue, L. Sukhikh, N. Terunuma, D. Verigin, J. Urakawa	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A763 (2014) 424–432	平成26年11月	国外	△

掲載した論文名	発表者氏名	掲載誌名	発表時期	国内・外 の別	本委託費の成果か ○:ほぼ全て △:一部
Coherent radiation spectrum measurements at KEK LUCX facility	M. Shevelev, A. Aryshev, S. Araki, M. Fukuda, P. Karataev, N. Terunuma, J. Urakawa	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A771 (2015) 126–133	平成27年1月	国外	○
Temporal profile measurement of an electron bunch with the two-cell rf deflecting cavity at Waseda University	Kazuyuki Sakaue, Yuichi Nishimura, Masahiro Nishiyama, Takenoshin Takahashi, Masakazu Washio, Toshikazu Takatomi, Junji Urakawa	Japanese Journal of Applied Physics 54, 026301 (2015)	平成27年1月	国内	△
X-ray generation by inverse Compton scattering at the superconducting RF test facility	Hirotaka Shimizu, Mitsuo Akemoto, Yasuo Arai, Sakae Araki, Alexander Aryshev, Masafumi Fukuda, Shigeki Fukuda, Junji Haba, Kazufumi Hara, Hitoshi Hayano, Yasuo Higashi, Yosuke Honda, Teruya Honma, Eiji Kako, Yuji Kojima, Yoshinari Kondo, Konstantin Lekomtsev, Toshihiro Matsumoto, Shinichiro Michizono, Toshinobu Miyoshi, Hirotaka Nakai, Hiromitsu Nakajima, Kota Nakanishi, Shuichi Noguchi, Toshiyuki Okugi, Masato Sato, Mikhail Shevelev, Toshio Shishido, Tateru Takenaka, Kiyosumi Tsuchiya, Junji Urakawa, Ken Watanabe, Seiya Yamaguchi, Akira Yamamoto, Yasuchika Yamamoto, Kazuyuki Sakaue, Seiichi Hosoda, Hokuto Iijima, Masao Kuriki, Ryuta Tanaka, Ayaka Kuramoto, Mathieu Omet, Ayaki Takeda	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A772 (2015) 26–33	平成27年2月	国外	○

掲載した論文名	発表者氏名	掲載誌名	発表時期	国内・外 の別	本委託費の成果か ○：ほぼ全て △：一部
CST simulation of THz radiation from a channel with periodically variable radius	A.A. Ponomarenko, K.V. Lekomtsev, A.A. Tishchenko, M.N. Strikhanov, J. Urakawa	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B355 (2015) 160-163	平成27年3月	国外	△
CST simulations of THz Smith–Purcell radiation from a lamellar grating with vacuum gaps	K. Lekomtsev, P. Karataev, A.A. Tishchenko, J. Urakawa	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B355 (2015) 164-169	平成27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：「3次元8鏡リング型光共振器を用いた偏光X線及び干渉性X線発生光共振器」
（浦川順治、本田洋介）特許出願
出願番号（出願日）：US61/987126（2014/05/01）、PCT/JP2014/082772（2014/12/04）

2.4 活動（運営委員会等の活動等）

活動内容	日時	場所
第6回全体会議	平成26年4月16日 13:00～16:00	株式会社リガク 東京工場セミナーホール
第7回全体会議	平成26年7月1日 13:30～16:30	日本大学理工学部 船橋公舎テクノブレース15
第8回全体会議	平成26年9月30日 13:00～17:00	日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所
第9回全体会議	平成26年12月24日 13:30～17:00	産業技術総合研究所 2-12棟2階第6会議室
第10回全体会議	平成27年3月5日 14:30～18:00	高エネルギー加速器研究機構 2号館1階会議室大
「光・量子融合連携研究開発プログラム」 シンポジウム 主催： 文部科学省、 高エネルギー加速器研究機構 共催： 九州大学、京都大学、東京大学、 日本原子力研究開発機構、 理化学研究所、J-PARC センター	平成26年12月8日 9:30～18:15	秋葉原コンベンションホール 来場者数：162人

2.5 実施体制

別表1 平成26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 ・LUCXでの研究開発 ・cERLでの研究開発 ・クライオ高周波電子銃開発協力 ・レーザー開発協力 ・X線検出器およびX線イメージング法の研究開発	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設	◎◎浦川 順治 ◎◎照沼 信浩 荒木 栄 本田 洋介 小菅 淳 赤木 智哉 福田 将史 M.Shevelev K.Lekomtsev 高富 俊和 吉田 光弘 新井 康夫 三好 敏喜 田内 利明 久保 浄 黒田 茂 奥木 敏行
②超伝導高周波加速空洞運転技術の確立 ・STFでの超伝導空洞研究開発 ・cERLでの超伝導空洞研究開発	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設	◎◎浦川 順治 ◎◎照沼 信浩 久保 毅幸 早野 仁司 内藤 孝 大森 恒彦 幅 淳二 佐伯 学行
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 ・光高周波電子銃用新マルチアルカリ光カソード開発 ・レーザー蓄積装置のフィードバック技術開発	国立大学法人広島大学・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 ・325 MHz スポーク型超伝導空洞の開発 ・高量子効率カソードの開発	独立行政法人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 佐伯 学行
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	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	学校法人日本大学	○田中 俊成 境 武志 中尾 圭佐 野上 杏子 稲垣 学 新富 孝和

業 務 項 目	担当機関等	研究担当者
⑦大強度高繰り返しレーザー開発	学校法人早稲田大学・理工学術院総合研究所	○鷺尾 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	独立行政法人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	国立大学法人京都大学・化学研究所	○岩下 芳久 頓宮 拓 藤澤 博
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	国立大学法人東北大学・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	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設	◎○浦川 順治 ◎○照沼 信浩 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。

