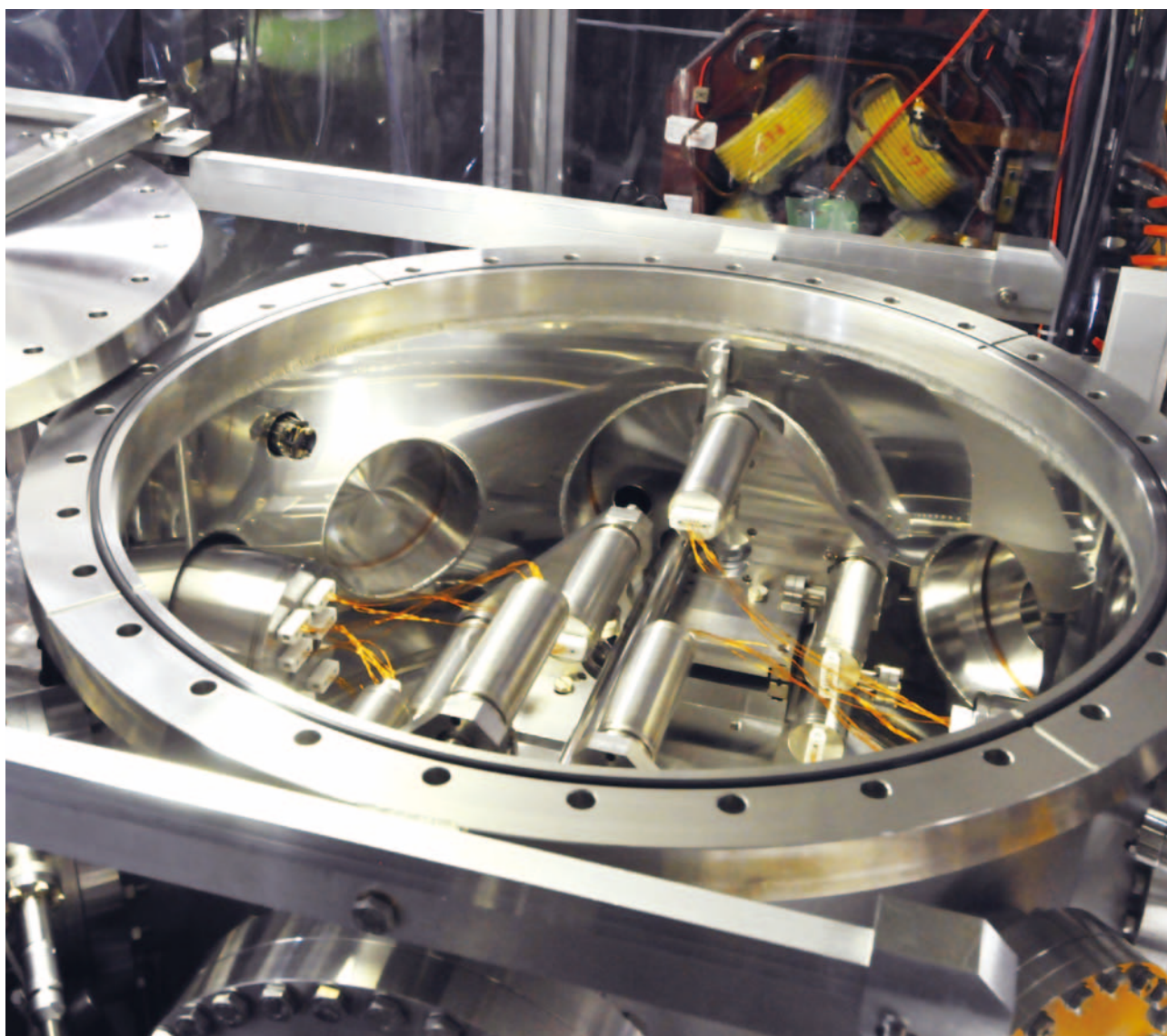


January. 2011

高輝度光子ビーム源開発室 ニュース

Quantum Beam Technology Program supported by MEXT

Vol.5



フランス LAL グループが 2010 年 8 月に 1.3GeV 蓄積リング加速器に設置した 4 mirror optical cavity である。

既に 2kW 程度の平均レーザーパワーを蓄積して、衝突角 8 度で電子ビームとの衝突実験を行い、ガンマ線を測定している。蓄積平均パワーの目標値は 100kW から 1MW である。入射レーザーパルスパワーを徐々に 100W に上げて、optical cavity 内での増幅率の目標を 1000 倍以上に設定して、これから 2 年以上の技術蓄積を KEK-ATF グループと共同して進める。フランスでは民間企業と協力して THOMX project を推進している。

新年明けましておめでとうございます。本年も宜しくお願い致します。高輝度光子ビーム源開発室ニュース Vol.5 をお送り致します。ニュース Vol.5 の記事として、2011 年から 2012 年に行う小型高輝度 X 線源の性能確認実験計画の概要を浦川が報告します。高エネルギー加速器研究機構

・素粒子原子核研究所、大森恒彦氏に 2010 年 6 月に行われました「POSIPOL2010 国際ワークショップ」の報告をお願いしました。

ニュース Vol.6 は開発レーザー装置の実用化と本光子ビーム源を使った応用実験に関する報告を行う予定です。ご期待下さい。

■小型高輝度 X 線源の性能確認実験計画

浦川順治

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

はじめに

2008 年 9 月から開始しました量子ビーム技術プログラムの小型高輝度 X 線源開発の性能確認実験計画がほぼ決まりましたので、その概要について報告致します。常伝導小型加速器 (LUCX) による X 線発生およびイメージング測定を 2011 年中に行い、2012 年は超伝導線形加速器 (STF の前段部) を使ったより高輝度な X 線発生を行う計画です。この性能確認実験を行うために、光高周波電子源およびレーザー蓄積共振器の高性能化と電子ビーム・レーザービームの衝突技術に関する高度化を進めてきました。本受託事業の概要は本ニュース Vo.3 および日本原子力学会誌 Vol.52, No.11(2010), p.725 で報告しましたので、そちらも参照して下さい。今後 2 年間の実験計画について報告致します。

LUCX (Laser Undulator Compact X-ray source) での実験計画

2011 年は超伝導リニアック試験施設 (STF) に設置する装置の発注、据え付け、Alignment、装置調整試験があるので、LUCX での X 線生成およびイメージング測定実験は非常に大変であるが、STF での性能実証試験に必要な基盤技術確立するために必須の実験である。まず、LUCX の装置を説明して、そこで行う実験の内容を説明する。

2001 年度に開始された「先進小型加速器事業」の関連加速器技術開発として、レーザーを蓄積するスーパーキャビティー開発を 5 年間行った。この開発事業では小型硬 X 線放射光源(約 10m 長)を医療診断に使うための必須の基盤技術としてスー

パーキャビティー開発を進めたので、X 線生成が行えるように大強度電子ビーム源開発と小型線形電子加速器開発も行った。2005 年度事業終了までに X 線生成実験を行えなかったが、この事業によって大強度電子源製作と高性能スーパーキャビティー製作技術を確立した。その後、2007 年度と 2008 年度に博士課程の学生が装置の改良を行い、マルチバンチ X 線生成実験を成功させた。この実験によって、30keV X-ray の Flux が $1.2 \times 10^5 \text{ Hz}/10\% \text{ b.w.}$ で安定に得られ、色々改良すべき問題点も明らかになった。図 1 に 2009 年 3 月に達成された LUCX の成果と 2009 年度から 2010 年度に新 LUCX で目標とした電子ビームとレーザービームの数値を書き入れたものを示す。2.8 ナノ秒ごとに約 10 ピコ秒幅の X 線 100 パルスを MCP 検出器で測定した結果が示されている。X 線フラックスを 1000 倍以上にするために電子ビームのパルス当りのバンチ数を 100 から 8000 まで増やす必要がある。そのために必要な高周波源装置を追加した。また、電子ビームとレーザービームを衝突点で $10\mu\text{m}$ 以下にするために、電子源の高性能化やレーザー蓄積装置の高性能化を行っている。さらにレーザーパワーを 100 倍以上にする新レーザー蓄積装置開発も進めている。しかし、最先端技術開発は優秀な人材と時間そして多くの工夫が必要であり、現状では $0.5 \text{ nC}/\text{bunch}, 300 \text{ bunches/pulse}$ が 2010 年夏に実現した程度であり、レーザー平均パワーについては約 80kW で実績値 40kW の 2 倍程度である。それぞれの目標値を達成するのに 1 年から 2 年程度さらなる開発と創造的努力が必要である。

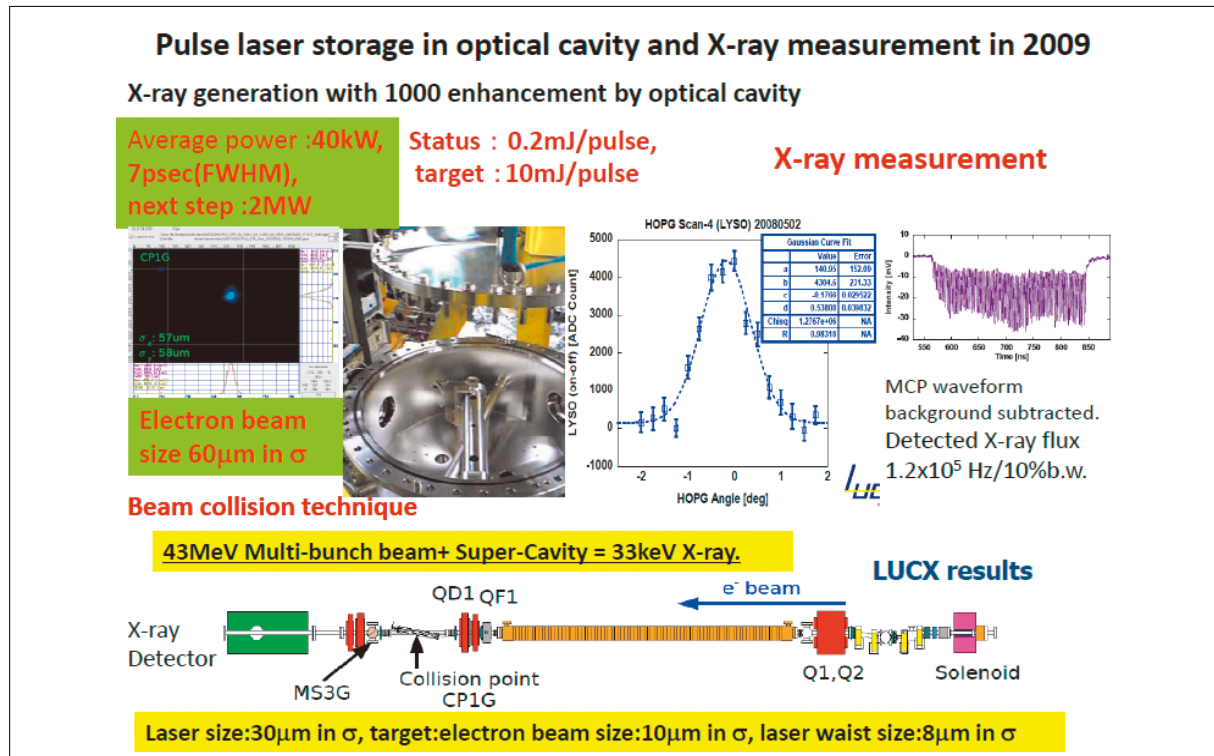


図 1. 2009 年 3 月までに達成された LUCX の成果と次の目標

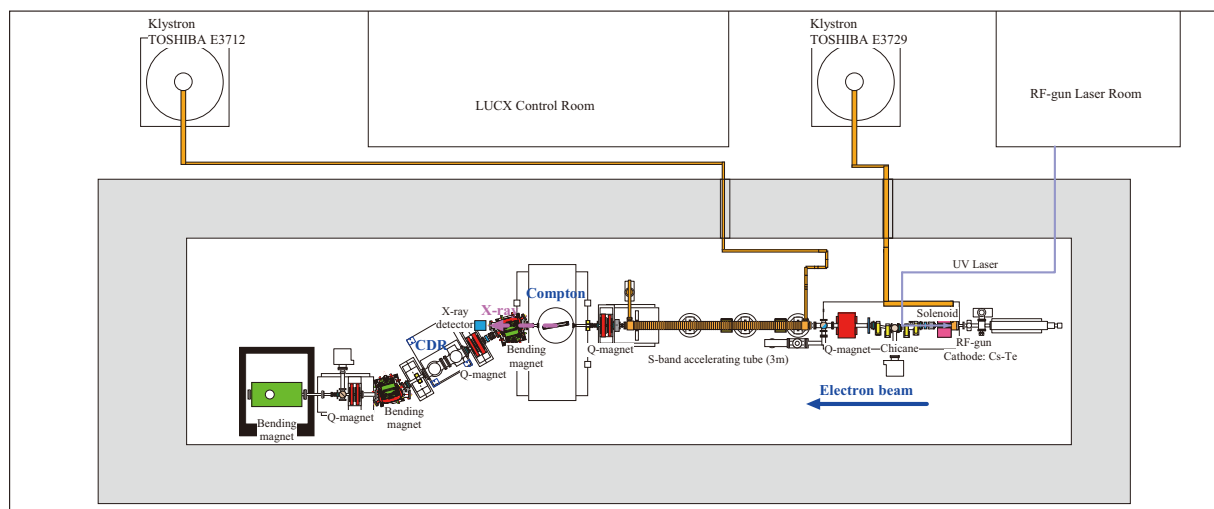


図 2. 改良後の LUCX の装置配置

図 2 に改良後の LUCX の装置配置を示す。1 台の高周波源から独立の 2 台の高周波源で LUCX の電子源および加速装置をそれぞれ独立に運転できるようになった。また、X 線測定装置の設置空間を左上に設けた。大電力高周波のパルス幅を 2μsec から 24μsec まで延ばす運転を可能にするには、高周波電源の PFN 回路の改造とクライストロン・導波管・加速管等の RF エージングが必

要であり、さらに 1 年以上の調整運転を行わなければならない。そこで、X 線フラックスを増やして、イメージング測定技術を取得しながら同時に基盤技術を高度化する実験計画を提案する。

表 1 は電子・レーザー両ビームパラメータと衝突条件および理想的な場合に期待される X 線フラックスを示したものである。2011 年 1 月から各装置の準備・調整を行いながら、step-by-step で

X線フラックスを上げて、最先端のイメージング像を取得することによって、小型X線発生装置(LUCX)の性能を評価する。 10^8 photons/10%bw・sec以上のフラックスを検出できた時が生物等のイメージング測定を行うタイミングであると判断している。3月末までに小さな昆虫等の測定を行えるように各装置の性能 Upgradeを進める。

STF (Super-conducting accelerator Test Facility) での実験計画

図3に示す装置の電磁石、架台、真空装置、設置および Alignment を12月末までに終了させて、2012年1月からビーム運転を開始する。3月末までに放射線許可申請のための検査を受けるので、それまでに500W程度のビームパワーを

表1：電子・レーザー両ビームパラメータ、衝突条件、期待されるX線フラックス (LUCX)

電子ビーム	レーザーパルス	衝突条件	10% bandwidth X-ray rate [Hz] (計算値)	検出器アクセプタンス内の X-ray rate (測定値)
40MeV, 100bunches/pulse, 12.5Hz operation, bunch charge=0.4nC, 2.8nsec bunch spacing, $\sigma_{ez}=6$ psec	0.112mJ/pulse, 357MHz burst mode operation in cavity, $\sigma_{lz}=3$ psec	$\sigma_{ex}/\sigma_{ey}=200/40\mu\text{m}$, $\sigma_{lx}/\sigma_{ly}=30/30\mu\text{m}$, Crossing angle 20deg.	1.34×10^5	1.2×10^5
300bunches/pulse, bunch charge=0.5nC, 他同上	1.12mJ/pulse, 357MHz burst mode operation in cavity	$\sigma_{ex}/\sigma_{ey}=60/30\mu\text{m}$, $\sigma_{lx}/\sigma_{ly}=30/30\mu\text{m}$, 他同上	6.6×10^6	
同上	同上	Crossing angle 10deg.	1.2×10^7	
同上	同上	Head-on	3.5×10^7	
8000bunches/pulse, 他同上	同上	Crossing angle 10deg.	3.3×10^8	
同上	同上	Head-on	9.4×10^8	
同上	同上	$\sigma_{ex}/\sigma_{ey}=60/30\mu\text{m}$, $\sigma_{lx}/\sigma_{ly}=30/30\mu\text{m}$, Crossing angle 10deg. 他同上	1.1×10^9	
同上	同上	Head-on	8.5×10^9	
同上	10.2mJ/pulse, 357MHz burst mode operation in cavity	同上	8.5×10^{10}	

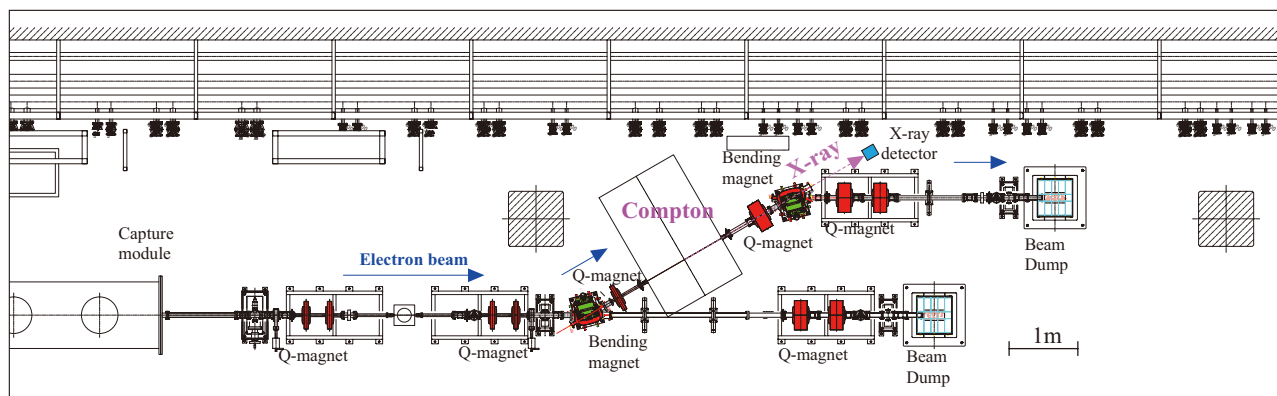


図3. 量子ビーム実証実験用装置配置 (衝突角度 10 度の場合)

出す必要がある。現在、衝突角度 10 度と正面衝突の場合について、パルスレーザー蓄積装置と加速器収束装置との配置を検討している。衝突角度 10 度の場合、電子ビームの規格化エミッタンスを 1mmrad と仮定すると 30 μ m 程度までビームサイズを絞ることが現実的であり、10 μ m 以下の目標に到達できない。正面衝突の場合、4 極電磁石を衝突点に近づけ 10 μ m のビームサイズが可能になり、X 線検出装置の空間も大きく取れるので非常に魅力的である。

表 2 に STF 実験の場合の電子・レーザー両ビームパラメータと衝突条件および理想的な場合に期待される X 線フラックスを示す。日本で始めての超伝導加速器による 10mA 電子ビーム加速に成る。まず、100 μ sec ビームパルス幅から 1msec ビームパルス幅まで徐々に電子ビーム強度を上げるのに、少なくとも 3 カ月程度の調整期間が必要になると思われる。STF 開発装置は国際リニアコライダー (ILC) の装置であるので、2012 年 7 月までが量子ビームの実験期間である。ここでは 162.5MHz で 1msec pulse 長のマルチバンチ電子ビーム生成 (162,500bunches/pulse) を行い、加速することになる。バンチ当たりの電子ビーム強

度を 0.1nC/bunch と仮定しても、16mA の電子ビーム強度になる。本実験終了後、レーザー装置等は Compact ERL 装置に移設して、準 CW 高輝度 X 線生成実験に使えるようにする。Compact ERL がビーム運転を行っていれば、そこでも応用実験の試験が可能になる。ここで順調に実験が行えれば 200 倍の X 線フラックスが期待できる。

総合技術蓄積、総合システム構築および性能実証実験は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の超伝導リニアック試験施設 (STF) で行う。この装置の基盤技術開発を若手研究者が自主的に行い、その研究指導および開発過程で新しい技術を確立させることによって、若手研究開発者を育てることも本事業の目的である。本委託事業の活動状況は <http://kocbeam.kek.jp/> で公開して、常に最新の成果等が納税者に理解して頂けるように努めている。また、年 3 回以上、高輝度光子ビーム源開発室ニュースを配布して、本プログラム関係者および一般の方々へ関連する最新技術の開発状況の周知を図っている。皆様のご理解とご支援を得て、社会に貢献できる最先端加速器基盤技術を確立する予定である。

表 2：電子・レーザー両ビームパラメータ、衝突条件、期待される X 線フラックス (STF)

電子ビーム	レーザーパルス	衝突条件	10% bandwidth X-ray rate [Hz] (計算値)
40MeV, 162500bunches/pulse, 5Hz operation, bunch charge=0.062nC, 6.15nsec bunch spacing, $\sigma_{ez}=8.7$ psec	10.0mJ/pulse, 162.5MHz burst mode operation in cavity, $\sigma_{lz}=4.3$ psec	$\sigma_{ex}/\sigma_{ey}=30/30\mu\text{m}$, $\sigma_{lx}/\sigma_{ly}=30/30\mu\text{m}$, Crossing angle 10deg.	2.2×10^9
同上	同上	Head-on	1.3×10^{10}
同上	同上	$\sigma_{ex}/\sigma_{ey}=10/10\mu\text{m}$, $\sigma_{lx}/\sigma_{ly}=10/10\mu\text{m}$, Crossing angle 10deg.	6.9×10^9
同上	同上	Head-on	1.2×10^{11}

■ POSIPOL2010 国際ワークショップ報告

大森恒彦

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

2010年5月31日(月)から6月2日(水)の3日間にわたり、KEKで「POSIPOL2010 国際ワークショップ」が開催された(脚注1)。このワークショップは次世代の電子・陽電子直線衝突型加速器である国際リニアコライダー(ILC)計画およびコンパクト・リニアコライダー(CLIC)計画を念頭に、主として偏極陽電子源(脚注2)についての検討を行うことを目的に毎年開催されているものである。

本ワークショップは、2006年にCERN(ジュネーブ)で第1回目が開催され、その後LAL-Orsay(パリ近郊)、広島、Lyonと毎年開かれ、今年のKEKでのワークショップで第5回目となる。本ワークショップはその名前が示すように偏極陽電子源を中心的な課題としている。リニアコライダーでは

偏極陽電子ビームを使用する事でカップリングを制御し、生成する粒子を選択し、この事によりバックグランド事象を大幅に抑制する事が出来る。また衝突によって生成された未知粒子は一般には弱い相互作用の固有状態の結合であるが、偏極ビームを使えば、その混合割合を解く事が出来る。

KEKで行なわれた今回のワークショップには、欧州、アジア、米国の各国から44名(うち4名はビデオ会議システムで参加)の研究者が参加した(写真1)。偏極陽電子の生成には、アンジュレーターを利用した方式とコンプトン散乱を利用した方式の2つの方式が検討されている。本ワークショップでは、それぞれの方式について複数の発表と活発な質疑応答が行なわれ、両者の比較検討等が行われた。コンベンショナル方式と呼ばれる



写真1：会議の出席者

脚注1：<http://atfweb.kek.jp/posipol/2010/>

脚注2：陽電子とは、電子の反粒子。通常は存在しないため、実験を行うためには、人工的に生成する必要があります。陽電子を生成する装置を「陽電子源」と呼びます。「偏極」とは、粒子のスピンの向きを一定方向に揃えることを呼ぶ。陽電子を偏極させることで、ビーム衝突時に起こる素粒子反応を効率的に識別することができる。

従来行われてきた金属のターゲット材に電子ビームを当てて陽電子(無偏極)を生成する方法についても再検討が行われ、ターゲット材として、結晶金属と普通の金属を組合せるハイブリッド方式ターゲットや、液体金属を使う方法、最適な電子ビームエネルギーやターゲットの厚さ等についても、活発な議論がなされた。さらに、直線衝突型加速器(リニアコライダー)以外の衝突型加速器の陽電子源や、ガンマ線、X線生成技術の他分野への応用等、広範な議論が行われた。

会議は西川 KEK 素粒子原子核研究所所長の歓迎の挨拶で始まった(写真2)。西川氏は日本の高エネルギーコミュニティの将来計画について、国際リニアコライダーが最優先で



写真2：開会にあたり歓迎の挨拶をする西川素核研所長

あること、国際リニアコライダーの前に KEKB と J-PARC によるフレーバーの物理を推進する事などの要点を述べた(図1)。

Welcome, K. Nishikawa, IPNS, KEK, POISPOL 2010

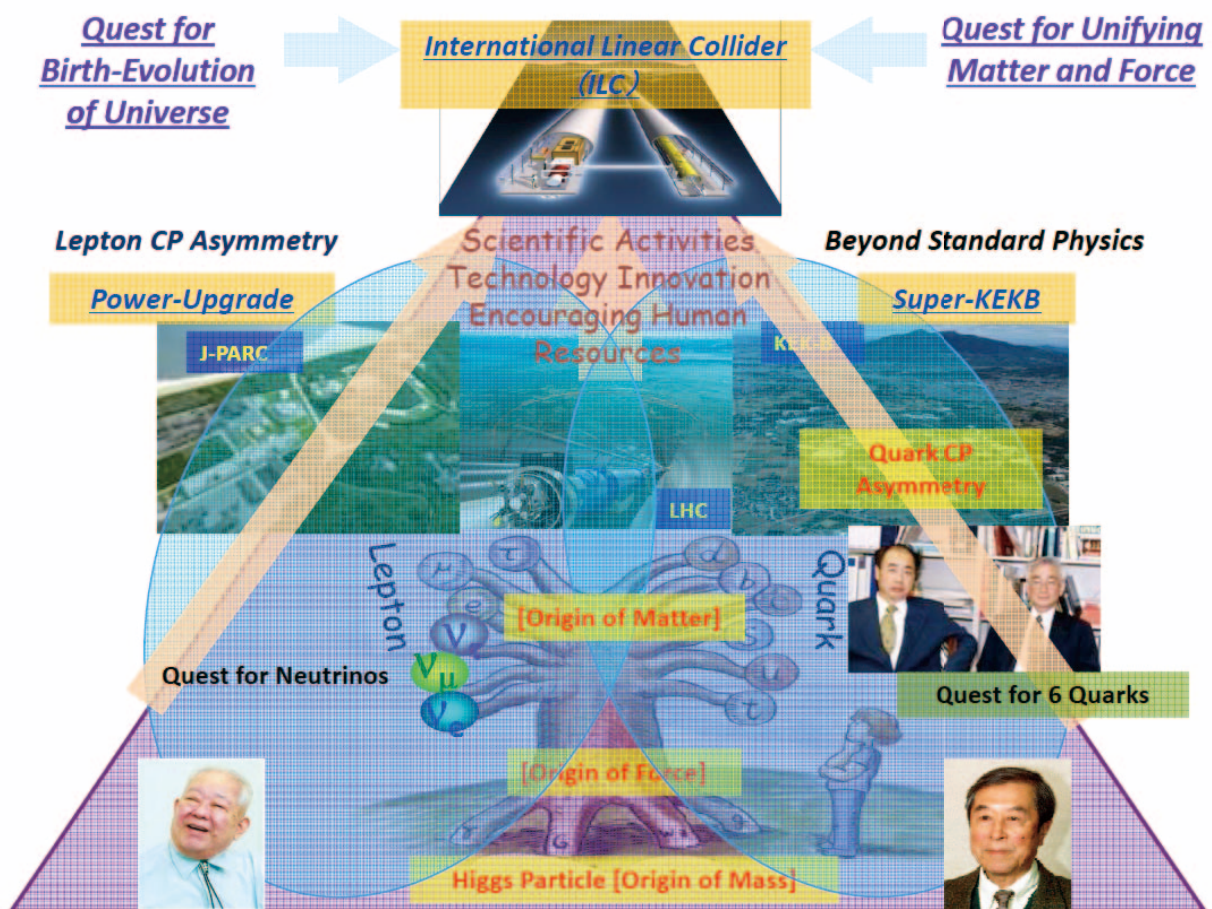


図1：西川素核研所長が示した日本の高エネルギーコミュニティの将来計画

会議は図2に示すように8つのセッションから成り立ち、挨拶やサマリーも含めて全部で36の発表があった。36の発表のうち、4つが実際に会場に来る事の出来なかった研究者によるビデオ会議システムを用いた遠隔発表であったことが現代的であった。本稿では会議の話題の中から「小型高輝度光子ビーム発生装置開発プロジェクト」に関係の深いコンプトン散乱を使った陽電子源、ガンマ線源、X線源を中心に報告する。

コンプトン散乱を利用したリニアコライダーの為に陽電子源のセッションでは10件の発表があった。コンプトン散乱を利用した陽電子源では、まず電子ビームとレーザー光を衝突させガンマ線を作り出す。この部分の技術はエネルギー領域が少し異なるだけで基本的には「小型高輝度光子ビーム発生装置開発プロジェクト」と同様のものである。作り出されたガンマ線を、金属ターゲットに当てて陽電子を作る。この陽電子源はレーザー光を偏光させる事によりガンマ線を偏極させ、したがって最終的に作り出された陽電子を偏極させる事が出来る。まず広島大学の栗木氏がコンプトン散乱を利用した陽電子源の概観をレビューした。栗木氏は、コンプトン散乱を利用した陽

電子源を、衝突させる電子ビームにストレージリングを利用するもの、エネルギー回収型リニアック(ERL)を利用するもの、リニアックを利用するものに分類し、それぞれの特徴をまとめた。米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)のVittary Yakimenko氏は上記のうちリニアックを利用するタイプのものに関する講演を行い「まず無偏極の従来型の陽電子源(コンベンショナル方式)で国際リニアコライダー・プロジェクトを開始し、その後にアップグレードとして置き換えるプランに適している」とこのタイプの利点を強調した(図3)。カラコフ物理研究所(KIPT)のEugene Bulyak氏とPeter Gladkikh氏は上記のうちストレージリングを利用するタイプのものに関して講演をおこない、Bulyak氏はレーザークーリングを利用した電子リングの設計について、Gladkikh氏は最適なレーザー波長について詳細な報告を行った。ハードウェアの開発に関しても多数の発表が行なわれた。フランスで線形加速器研究所(LAL)を中心にして行なわれている4枚の鏡を使ったレーザー光蓄積装置の開発状況に関して、LALのFabian Zomer氏による報告が行われた(脚注3)(図4)。4枚の鏡を使ったレーザー光

36 Presentations

Welcome and Scope: (2 talks)

Status of e⁺ sources for colliders : (3 talks)

Compton-based e⁺ sources for colliders(ILC&CLIC): (10 talks)

Physics: (1 talk)

R/D Plan (ILC-CLIC working group) : (1 talk)

**Compton-based X-ray and gamma-ray sources : (4 talks)
(including appl. to material physics)**

Undulator-based e⁺ source for ILC: (4 talks)

Hybrid and channeling e⁺ sources (CLIC&ILC): (7 talks)

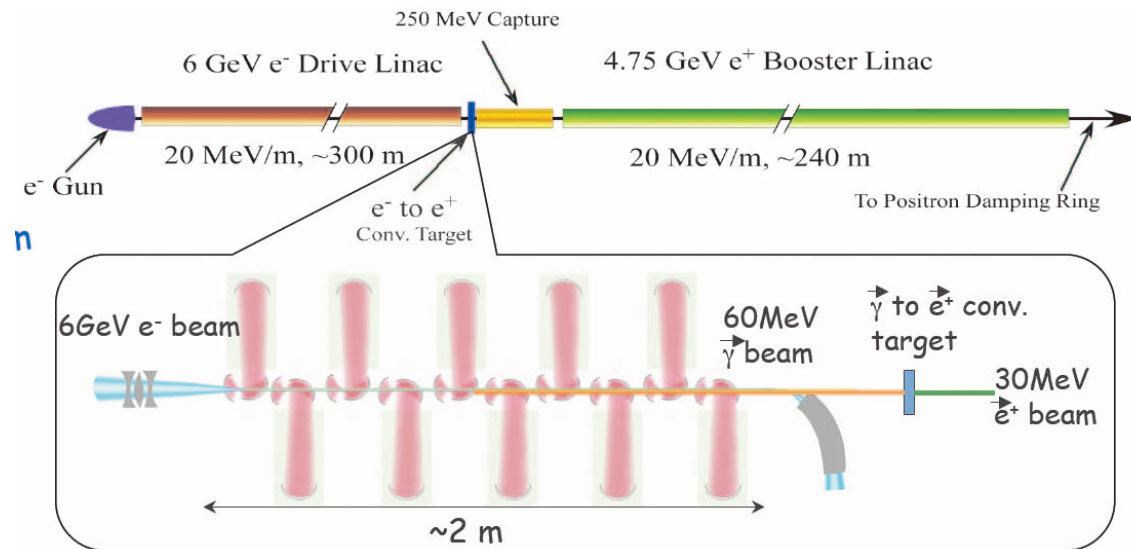
Liquid Pb and Pure Conventional e⁺ sources (ILC): (3 talks)

Summary: (1 talk)

図2: POSIPOL 2010 会議のセッションの一覧

脚注3: この4枚の鏡を使ったレーザー光蓄積装置は2010年の7月にフランスの研究者チームと共にKEKに運び込まれ、KEKの先端加速器試験施設(ATF)のダンピングリングに組込まれ、10月からガンマ線生成実験が始まった。

• Linac-based Compton e^+ source for ILC: V. Yakimenko (BNL)



- No positron accumulation is needed:
- Can be add-on option for non-polarized linac source.

図 3 : 6 GeV の電子ビームと複数の CO_2 レーザーを組み合わせた偏極陽電子源。コンベンショナル方式からのアップグレードが容易。

• Status of 4-mirror cavity for ATF : F. Zomer (LAL)

Cavité Fabry-Perot mounting (in a class 10 clean room)

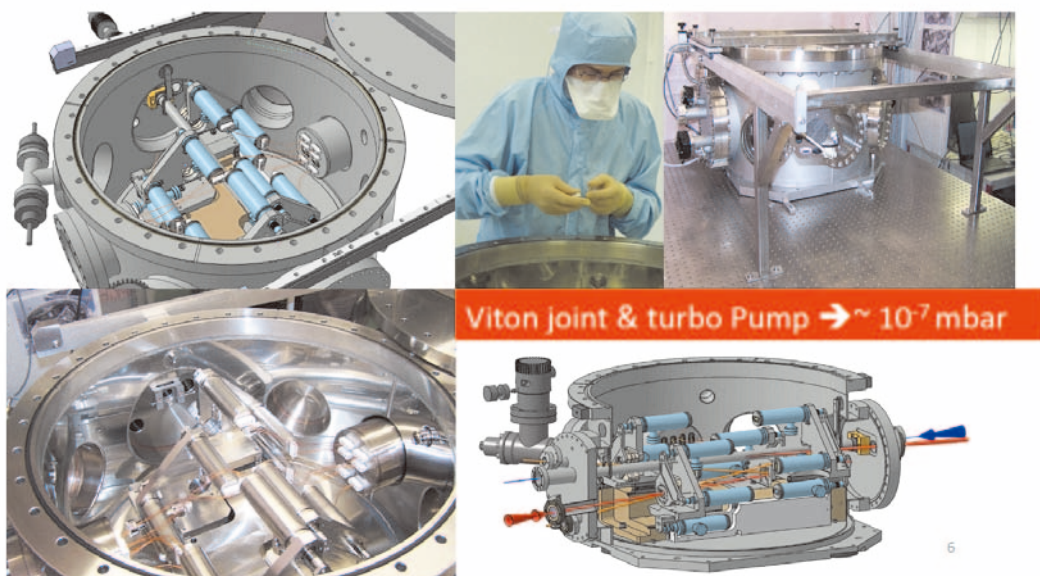


図 4 : 4枚の鏡を使ったレーザー光蓄積装置

蓄積装置は通常の2枚の鏡のものに比べて横方向のアライメントトレランスが2桁以上緩和出来るという特徴があり、これを活かして今までより小さなスポットサイズを実現する事を目指している。4枚の鏡を使ったレーザー光蓄積装置に関しては日本でも広島大、早大、KEKによる(脚注4)開発が進んでおり、その開発を広島大学の赤木智哉氏が報告した。エネルギー回収型リニアック ERL を利用するコンプトンガンマ線源に関しては LAL の I. Chaikovska 氏が講演を行い、国際リニアコライダーを念頭に、特に最適な衝突点の個数について報告した。広島大学の三好修平氏は2枚の鏡を使ったレーザー光蓄積装置を用いて ATF で行われている実験について報告した(脚注5)。この装置は ATF に組み込まれて既に3年になり、そ

の間少しずつ性能を向上させると共に、前述の4枚鏡ミラーを用いた光蓄積装置の設計の為に有益な情報を提供し続けている。

コンプトン散乱を利用したX線源とガンマ線のセッションでは4件の講演があった。コンプトン散乱を利用する方式は、X線源、ガンマ線、陽電子源と幅広い応用が可能で、パルス構造も様々な選べるのが強みである。そして電子ビームとレーザー光を衝突させる部分はいずれの場合も非常に共通性が高く、これは「小型高輝度光子ビーム発生装置開発プロジェクト」で開発された技術が幅広く利用可能である事を示しており、またリニアコライダー等の他のプロジェクトで開発された技術も、すぐに「小型高輝度光子ビーム発生装置開発プロジェクト」に取り入れる事が出来るとい

• Compton program in KEK, J. Urakawa (KEK)

From 2011.9 to 2012.7 at STF

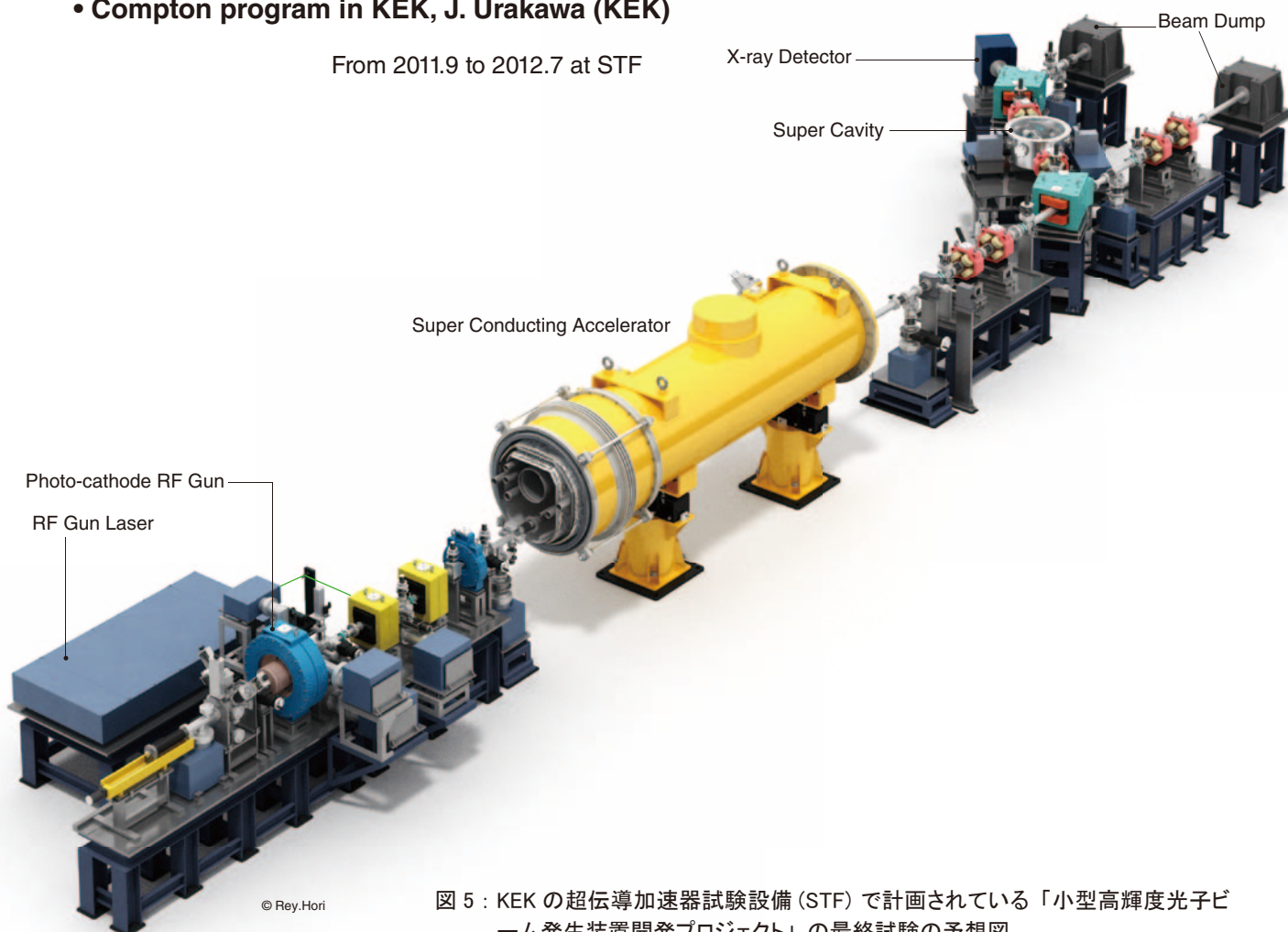


図5：KEKの超伝導加速器試験設備(STF)で計画されている「小型高輝度光子ビーム発生装置開発プロジェクト」の最終試験の予想図

脚注4：2010年9月から成蹊大が加わった。

脚注5：三好氏は残念ながら会議に参加出来なかったため、三好氏のスライドを同じ広島大学の高橋氏が代読した。

う事でもある。このセッションではまず「小型高輝度光子ビーム発生装置開発プロジェクト」の代表者である KEK の浦川順治氏が超伝導電子加速技術とレーザー技術を組み合わせた高輝度光子源開発についての総合的な講演を行った(図5)。続いて KEK の足立伸一氏が小型 ERL を用いたコンプトン X 線源により物性研究を行う計画を紹介した(図6)。足立氏の講演ではコンプトン X 線源は小型で高品質な X 線を供給出来るので物性分野においても大きな期待がかけられている事が報告された。ERL 加速器は超伝導加速技術の応用であり、その点でも「小型高輝度光子ビーム発生装置開発プロジェクト」との共通性が高い。原子力研究開発機構の羽島良一氏は同じく ERL を使いコンプトン散乱によりガンマ線を作り、そのガンマ線を放射性物質の探索に使い安全性を向上させる技術を紹介した。KIPT の Peter Gladkikh 氏も同様にガンマ線を放射性物質の探索に使い放射性物質の処理の能率の向上に役立てる可能性につい

て報告した。同氏の案は羽島氏と異なり電子ビームとして ERL ではなくコンプトン散乱利用の為に専用に設計されたストレージリング(図7)を用いる。

本ワークショップは比較的少人数でパラレルセッションは無く、すべての人が全部の講演を聴き議論に参加出来た。そのため3日間であったが非常に密度の濃いものになった。本ワークショップは冒頭でも述べたようにリニアコライダーの為に偏極陽電子源を主たるテーマとしコンプトン散乱利用とアンジュレーター利用の偏極陽電子源、そしてコンベンショナル方式の陽電子源、X 線、ガンマ線生成である。そのなかでコンプトン散乱利用の講演が半数近くを占めており、その適応範囲も軟 X 線、X 線、ガンマ線、陽電子生成と広く、また利用範囲も物性研究、医療、放射性物質探索、原子力、セキュリティ、高エネルギー物理学と大変広い事が示された事が印象深かった。

• Opportunities for materials science w/ inverse-Compton X-ray: S. Adachi

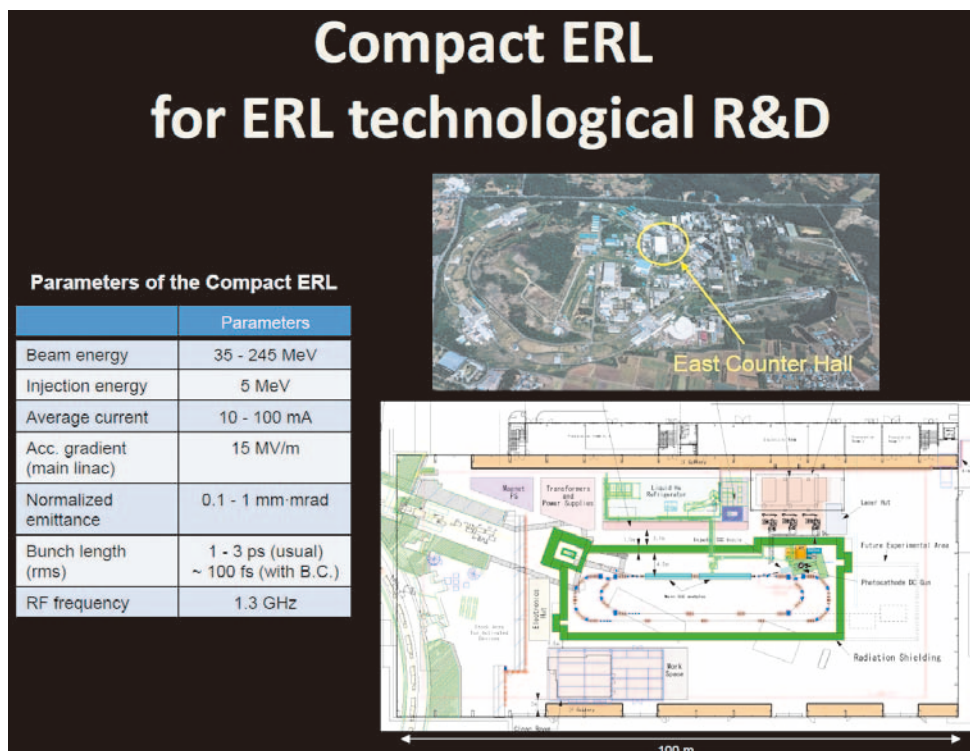
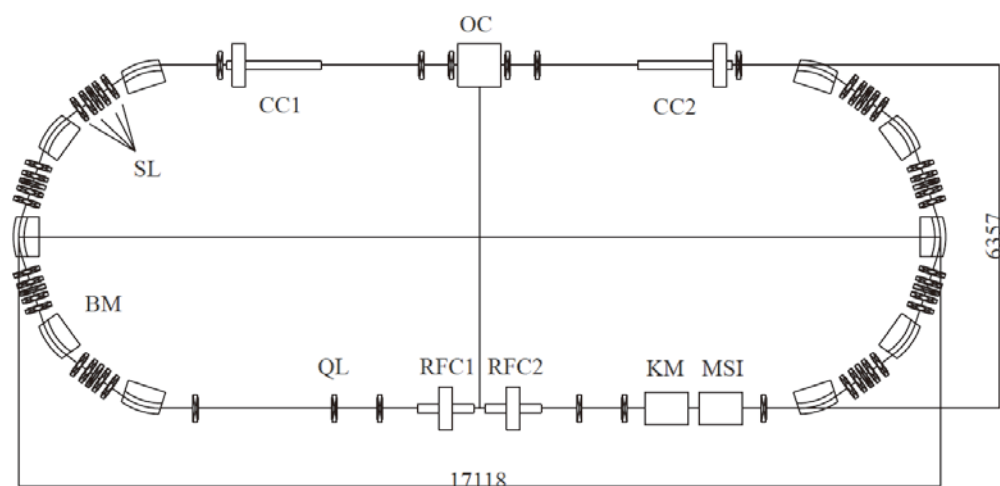


図6：コンプトン散乱利用の為に専用に設計されたストレージリング

- Compton ring for nuclear waste management: P. Gladkikh

Ring layout



BM, bending magnets; QL, quadrupoles; SL, sextupoles; RFC, rf cavities; OC, optical cavity; KM&MSI, injection magnets

図 7 : 小型 ERL を使った高性能 X 線源の開発計画

Acknowledgments

This News is supported by Quantum Beam Technology Program of the Ministry of Education, Science, Sports, Culture and Technology of Japan (MEXT).

量子ビーム基盤技術開発プログラム (2008-2012 年度)

Quantum Beam Technology Program supported by MEXT

次世代ビーム技術開発課題「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」(拠点責任者: 浦川順治)

Development for Next Generation Compact High Brightness X-ray Source using Super Conducting RF Acceleration Technique



大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

High Energy Accelerator Research Organization

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1 TEL 029(879)6248