

## 話 題

## SPring-8 新レーザー電子光ビームライン LEPS2 : 建設とコミッショニング

村松 憲仁<sup>\*1</sup>・與曾井 優<sup>\*2</sup>・依田 哲彦<sup>\*2</sup>・鈴木 伸介<sup>\*3</sup>

Construction and Commissioning of the New Laser Compton Backscattering Beamline at SPring-8 (LEPS2 Project)

Norihito MURAMATSU <sup>\*1</sup>, Masaru YOSOI <sup>\*2</sup>, Tetsuhiko YORITA <sup>\*2</sup> and Shinsuke SUZUKI <sup>\*3</sup>

### Abstract

The LEPS2 beamline, which produces a linearly polarized photon beam up to 2.9 GeV via laser Compton backscattering, has been constructed at SPring-8. This new project aims to increase the beam intensity one order of magnitude more than that of the LEPS beamline and to enable the construction of large acceptance detectors with high resolutions. The first photon beam was successfully observed in the measurements of energy spectrum, beam profile, and beam intensity. The construction and commissioning of the LEPS2 facility are described in this report.

### 1. はじめに

通常、我々は物を‘見る’ときに光を通して見ているが、認識できる大きさは光の波長程度までに限られる。より小さい物を‘見る’ためには、波長の短い光、即ち高エネルギーの光と、目に代わる検出装置を必要とする。X線、 $\gamma$ 線とエネルギーが上がるにつれて対象は原子・分子、原子核と小さくなり、波長が約 1 fm 以下となる GeV エネルギー領域では、核子のようにクォークから構成される粒子(ハドロン)が研究的となる。そして、光を用いたハドロン研究を進めるためには、信号観測に必要なエネルギーと強度を持ち、発散角が十分に抑制された光子ビームを加速器で作らなければならない。

光子ビームはクォーク・反クォーク対と結合し、0.91 GeV においてストレンジ・クォークを作り出す閾値を超える。アップ、ダウン、ストレンジのフレーバー(クォークの種類)を限定しない仮想的なハドロン・ビームとして魅力を持つ。また、ビームに混入するバックグラウンドは、ビームライン途中の物質で対生成される電子・陽電子のみ

であり、それらの除去はスイープ磁石やベトー・カウンターなどで容易に達成される。

GeV エネルギー領域の光子ビームは、その生成方法により、制動放射光ビームとレーザー電子光ビームに大別される。前者は、電子ビーム中に薄い(又は細い)放射体を挿入して得られ、JLab のホール B<sup>1)</sup> や ボン大学の ELSA<sup>2)</sup>、東北大学電子光理学研究センター<sup>3)</sup>などで運用されている。それに対して後者は、Feenberg と Primakoff<sup>4)</sup>による理論的考察を元に、1963 年に Milburn<sup>5)</sup> や Arutynian と Tumanian<sup>6)</sup>が提案した方法であり、数 GeV クラスの電子ビームにレーザー光を入射し、180 度反対方向に逆コンプトン散乱させて生成する。この時のビーム拡がりは  $1/\gamma$  rad 程度( $\gamma$  は蓄積電子の Lorentz ファクター)に抑えられ、微小な散乱角度は運動学的に光子エネルギーに依存する。

レーザー電子光ビームの強度は制動放射光ビームに比べて一桁小さい一方、エネルギー・スペクトルはコンプトン端を最大値とした比較的平坦な形状をしている。これにより、前方検出器系を光子ビーム軸上に設置しても、標識化できない低エ

<sup>\*1</sup> 東北大学電子光理学研究センター Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University (E-mail: mura@lns.tohoku.ac.jp)

<sup>\*2</sup> 大阪大学核物理研究センター Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University

<sup>\*3</sup> 公益財団法人高輝度光科学研究センター Japan Synchrotron Radiation Institute (JASRI)

エネルギー光子によるバックグラウンド反応が抑えられる。また、レーザーの偏光が光子ビームに移行するため、高偏極度が得られると同時に制御が容易である。放射光施設において、物性物理や化学、医薬、生物学といった広範な実験と共存可能であり、SPring-8のLEPS<sup>7)</sup> ( $1.5 < E_\gamma < 2.4$  GeV) や ESRF の GRAAL<sup>8)</sup> ( $0.55 < E_\gamma < 1.53$  GeV), BNL の LEGS<sup>9)</sup> ( $0.2 < E_\gamma < 0.42$  GeV) などで実用化されている。

この程、SPring-8では、光子ビーム強度の向上と実験施設の拡充を目指した、2本目となるレーザー電子光ビームライン (LEPS2) が完成した。本記事において、LEPS2ビームラインを作るに至った経緯、新ビームライン及び新レーザー入射系の概要と建設、付帯実験施設の整備、今年行われたばかりのビーム・コミッショニングについて紹介する。

## 2. LEPS から LEPS2 へ

LEPSビームライン (BL33LEP) は、SPring-8開始初期の1999年から運用を始めている。蓄積電子エネルギーが8 GeVと高いおかげで、他のレーザー電子光実験施設がカバーできない最大2.4 GeVまでの光子ビームを得ている(最近では、2.9 GeVまで引き上げられるが、これについては後述する)。当初は7 W出力のアルゴン気体レーザー(波長351 nm付近のマルチライン)を入射していたが、現在ではレーザー技術の進歩に伴い、半導体レーザーと高調波結晶を組み合わせ消費電力と冷却水量が大幅に改善された8 W全固体レーザー(波長355 nm)を用いている。レーザー光は、蓄積リング1セル2台の偏向電磁石間にある7.8 m直線部の中心付近(入射部より37 m上流)でフォーカスされ、トップアップ運転で常に100 mAに保たれている電子ビームと衝突する。散乱でエネルギーを失った反跳電子は、蓄積リングの偏向電磁石とその下流の位置検出器(タギング検出器)で運動量が解析され、事象ごとに光子エネルギーが測定される。このような標識化は1.5 GeV以上の光子に対して行われ、そのビーム強度は1 MHz程度であった。

LEPS実験は、光子ビームの高偏極度を前方で優勢となるt-チャンネル光生成反応においてパーティ・フィルターに活かし、また、検出器を据

え付ける場所の制約にも沿うため、主に前方アクセプタンスに特化したハドロン光生成実験を推進してきた。よって、水平(垂直)方向に $\pm 20$ 度( $\pm 10$ 度)覆う前方荷電粒子スペクトロメーターを蓄積リング棟内の実験ハッチ(逆コンプトン散乱点の70 m下流)に設置している。これまでに、光子エネルギー1.57 GeVが閾値の $\phi$ 中間子(光子と同じ量子数を持ち、ストレンジ、反ストレンジ・クォーク対から成る)や、質量が1.5 GeV程度までのハイペロン(ストレンジ・クォークを含むバリオン)の光生成機構を研究し、ハドロンの相互作用や成り立ちについて成果を挙げてきた<sup>10)</sup>。また、存在そのものが議論となっているペンタクォーク・バリオン $\Theta^+$ <sup>11)</sup> やスカラー中間子 $\kappa$ <sup>12)</sup>の示唆なども得ている。

しかしながら、エキゾチックなハドロン構造や未確定のハドロン共鳴状態、十分理解されていない反応機構などをさらに系統的に調べるには、ビーム強度増強による統計精度の向上や、大立体角検出器による微分生成断面積、偏極観測の測定が不可欠となってきている。これらの課題に対してLEPSビームラインは構造上の限界に達しているため、それらを飛躍的に克服するLEPS2新ビームラインの建設プロジェクトがスタートした<sup>13)</sup>。LEPS2実験では、例えば $\Theta^+$ から崩壊して出てくる全粒子を捕えて、その不変質量から $\Theta^+$ を同定し、その存在を確立すること、存在した場合にその性質と反応機構を調べること等を具体的な目標としている。図1はLEPS2ビームラインの概観を表しており、このビームラインが持つ2つの大きな特徴については、次節の概念設計の項で述べる。

## 3. LEPS2 ビームラインの建設

### 3.1 ビームラインの概念設計

LEPS2ビームライン (BL31LEP) は、SPring-8に4つしかない30 m長直線部の一つを利用して、長直線部の電子ビーム発散角は、図2(a)にある通り、水平方向で12  $\mu$ radと抑えられており、レーザー電子光ビームの拡がり、運動学的な散乱角度のみによってほぼ決まる。よって、蓄積リング棟外の広い空きスペースまで(約135 m)光子ビームを引き出しても、図2(b)のようにビーム径が十分に絞られている。蓄積リング棟外には、

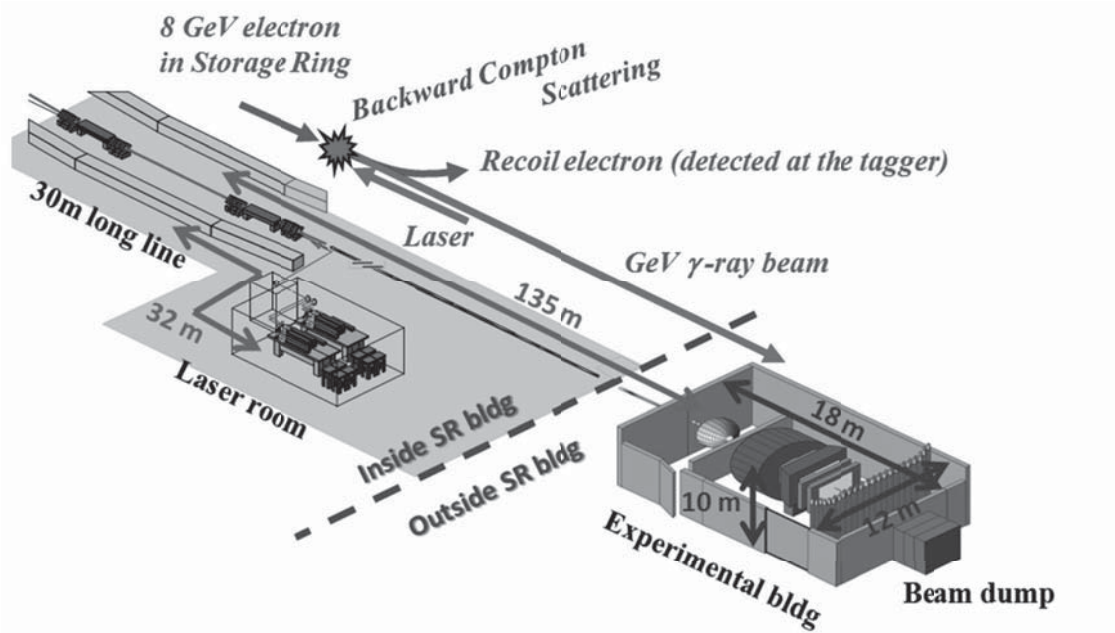


図 1 LEPS2 ビームラインの概観。蓄積リング棟実験ホール内からレーザー入射が行われ、30 m 長直線部で SPring-8 電子ビームと逆コンプトン散乱を起こす。エネルギー増幅された光子ビームは蓄積リング棟外の LEPS2 実験棟まで輸送される。

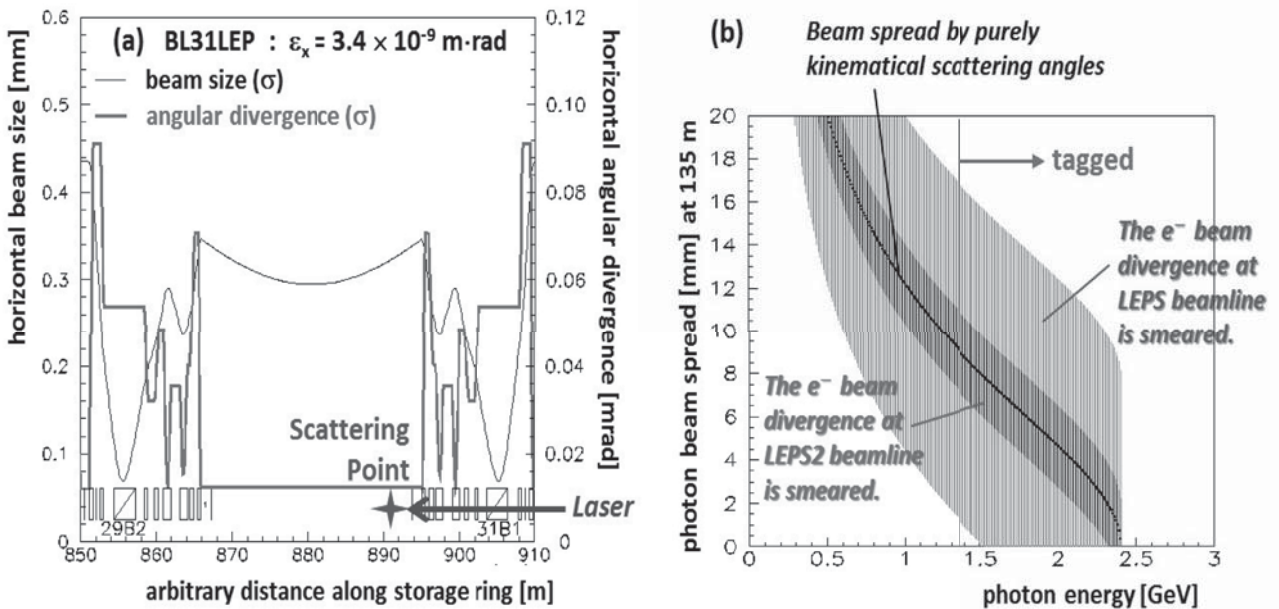


図 2 (a) SPring-8 長直線部における電子ビーム水平方向の断面サイズ及び発散角度。縦軸は左側にビームサイズのスケールを mm 単位で、右側に発散角度のスケールを mrad 単位で表している。(b) 逆コンプトン散乱点から 135 m 下流の LEPS2 実験棟におけるレーザー電子光ビームの拡がり。実線は光子エネルギーに依存した角度を持つ散乱コーンの半径を示し、淡色領域は LEPS ビームラインと LEPS2 ビームラインにおける電子ビームの水平発散角(それぞれ標準偏差の平均が  $58 \mu\text{rad}$  と  $12 \mu\text{rad}$ )を畳み込んだものである。

LEPS 実験の 15 倍の容積を持つ LEPS2 実験棟が建設され, 大立体角を覆う高分解能検出器系が設置可能となった。

LEPS2 実験では, 光子ビーム強度を一桁上げることがセールスポイントの一つであり, その基本デザインは, より高出力のレーザーの 4 台同時入射となっている。レーザー光は, 長直線部の下流域で焦点を結ぶよう, 約 32 m 離れたレーザー入射室においてビームエキスパンダーを使い, 直径 30 ~ 40 mm に拡大される。拡大されたレーザー光を 4 本並行入射できる口径がビームライン・チェンバーに確保されている。将来的に, 扁平な蓄積電子ビーム形状に合わせて, レーザー光断面を楕円に整形するアイデアもあり, これにも対応できる大口径となっている。

### 3.2 ビームラインの製作とインストール

2010 年 3 月に LEPS2 専用ビームライン設置実行計画書が SPring-8 に提出され, 審査会における審議を経て 6 月に計画承認された。その直後から新ビームライン用の真空チェンバーの製作が開始され, レーザー入射系の整備も並行して行われた。既述した通りの必要口径を確保した上で, 蓄積リングの磁石開口を通過できる真空チェンバーが製作された。2012 年夏には, 直線部下流の偏向電磁石付近からさらに下流の四極・六極磁石列付近に渡って, 既存チェンバーと交換された。偏向電磁石下流の真空チェンバーには蓄積リング内側にタギング検出器用の反跳電子出口窓 (3 mm 厚のアルミ合金) が設けてあり, 標識化エ

ネルギーの下限值は LEPS より低い 1.35 GeV 程度まで下げることが可能となっている。更に, 長直線部延長線上の最上流部にも, レーザー光を逃がす出射窓が取り付けられた。

入射レーザーは蓄積リング収納部側壁からレーザーを途中入射するように工夫されている。これにより, 下流 (レーザー入射部側) へ行くほど真空チェンバーのレーザー通過部及び窓に大きな口径を必要とする問題が改善されている。このような側壁入射に対応する真空チェンバー群 (フロントエンド部) も製作され, 2012 年の 12 月にインストールされた (図 3 参照)。フロントエンド部は, 入射レーザーを長直線部方向へ 90 度反射する第 1 ミラー (M1) チェンバー, 必要に応じて挿入できる X 線アブソーバー (ABS), ゲートバルブ (GV), 放射光アブソーバー (PDA) などから成っている。X 線アブソーバーの下流面には偏光測定のためにレーザー光を引き出すモニターミラー (M0) が一体物として取り付けられており, 狭いスペースで二役をこなす工夫が施されている。

長直線部で逆コンプトン散乱されてエネルギー増幅された光子ビームは, 入射レーザーと逆向きの経路をたどってフロントエンド部最下流の 2 mm 厚アルミ窓から取り出される。このアルミ窓の上流側には, 光子ビーム径より外側の X 線を落とす銅製のマスクが設置されており, 水冷されている。取り出された光子ビームは, 厚さ 1 mm のタングステン製 X 線アブソーバーと直径 7 mm の鉛コリメーターを通り, 直後のスイープ

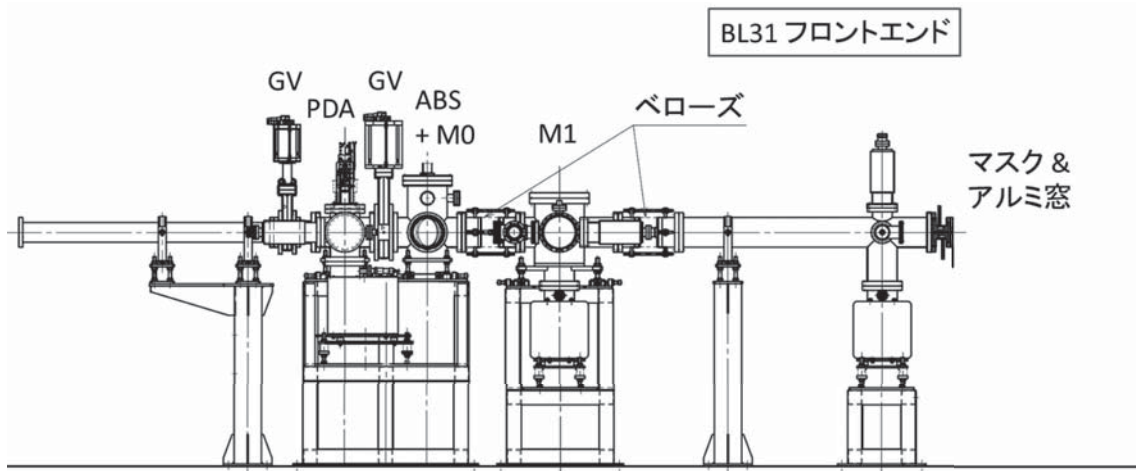


図 3 フロントエンド部真空チェンバーの側面図。レーザー光は紙面手前側から入射され, 第 1 ミラー (M1) により左側の蓄積リング方向へ反射される。レーザー電子光ビームは右側のアルミ窓から取り出される。

磁石で対生成された電子・陽電子を除いている。これらの機器は蓄積リング収納部内に設置されており、放射線レベルの上昇には問題のない設計となっている。

#### 4. レーザー入射系

##### 4.1 レーザー及び光学系

図4にレーザー入射部付近の平面図を示す。蓄積リング収納部側壁から入射を行うため、レーザー入射室は隣のビームラインをまたぐ形で作られている。4台の355 nm 波長全固体レーザーを大型の光学定盤上に並べ、2台ずつ高さを変えて設置している。設置レーザーはコヒーレント社製のPaladinシリーズで、最近の技術開発により紫外出力が16 W及び24 Wまで増大している。Paladinは80 MHzのパルス発振(疑似連続発振)をするが、パルス間隔が焦点付近のレイリー長の2倍程度であるため、508.58 MHzのRFでバンチ化されている電子ビームと同期を取らずに衝突させることができる。レーザーの消費電力が改善

されたことにより、複数台の同時運転がインフラ設備の増強をせずに実現可能となっている。既にLEPSビームラインでは、開口径の制約の下で最大限可能である2レーザー同時入射を8 W出力機で試みており、1.5～1.6倍程度の光子ビーム強度増加を観測している。

また、波長266 nmの深紫外レーザー4台も別の定盤に設置し、物理プログラムに応じて切り替えられるようにしている。1 W連続発振するオキサイド社の全固体レーザーFrequad-HPを順次用意しているが、このシリーズでは既に2 W出力機もリリースされており、今後の整備を検討している。深紫外レーザーの入射で、光子ビームの最大エネルギーが2.9 GeVまで引き上げられ、高質量のハドロン生成などを調べられるようになる。同様の高エネルギー光子ビームは、LEPSビームラインでも標識化ビーム強度0.2 MHz程度で生成されており、例えばK\*(892)中間子とハイペロンのt-チャンネル生成において、既述した通り、 $\kappa$ 中間子の交換が示唆されている。LEPS2

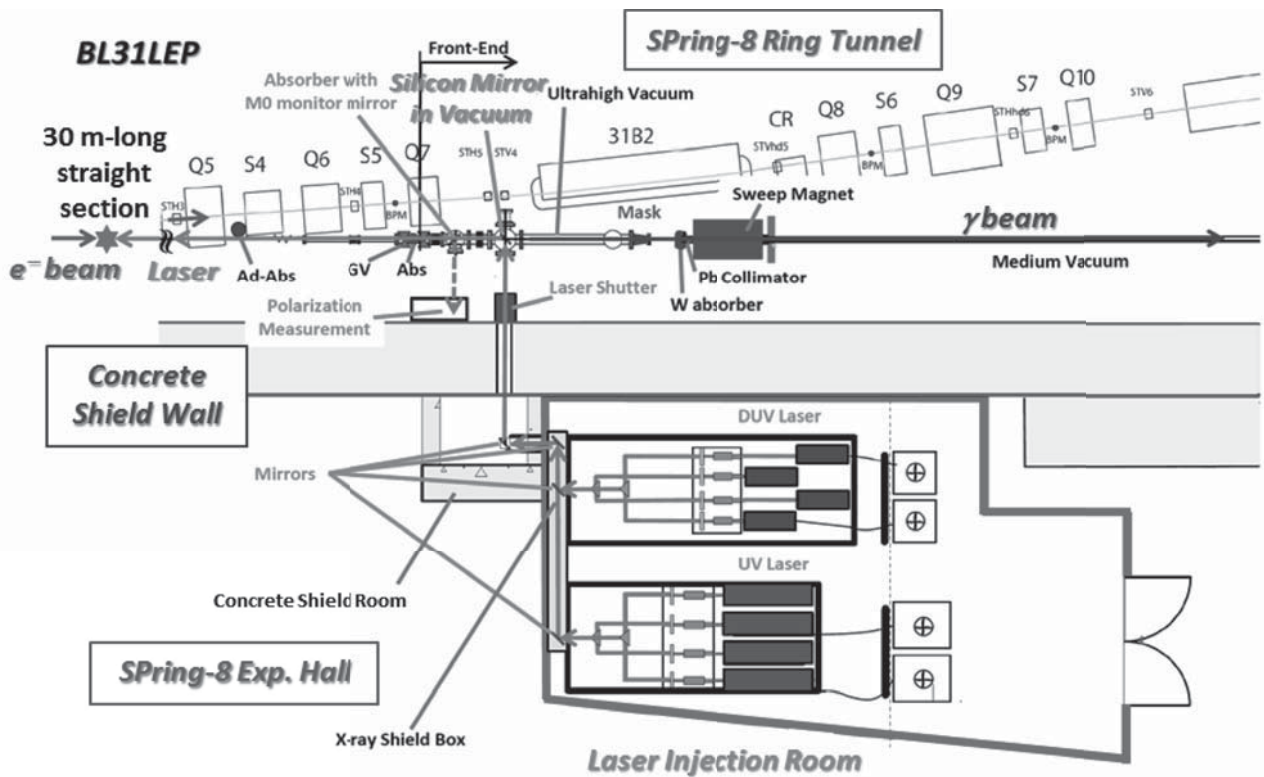


図4 レーザー入射室及び蓄積リング収納部内フロントエンド部の平面図。紫外(UV)または深紫外(DUV)レーザー光4本を小型コンクリート遮蔽室、さらには1 m厚収納部側壁からフロントエンド部へ入射し、シリコン・ミラー(M1)で左側の長直線部へ反射する。

ではこの光子ビームの大強度化を図り、原子核中の中間子質量の減少と束縛(カイラル対称性の部分的回復)を研究するなど、狙う物理の幅を広げる。

これらの紫外・深紫外レーザー光は、エキスパンダーで拡大し、エネルギー密度を落とした後、 $\lambda/2$ 波長板で直線偏光方向を制御する。さらに、各波長に最適化した合成石英ミラーを使って、2レーザー光ごとに直角プリズム型ミラーの左右両側へ入射する。直交した2つの反射面で、2レーザー光は隣り合いながら蓄積リング方向へと向かう。高さを変えた2つのプリズムにより、4つのレーザー光が正方形の各頂点位置に配置される形で入射される。隣接した4レーザー光は、紫外・深紫外の両波長で反射率の高い大型合成石英ミラーで3回反射され、コンクリート遮蔽された小型光学ハッチを通して収納部内に至る。

#### 4.2 レーザー入射部及びモニター系

コンクリート側壁に空いた穴から蓄積リング収納部内へ側面入射されたレーザー光は、フロントエンド部のICF203合成石英窓から超高真空部へと入り、第1ミラーで長直線部方向へ反射される。第1ミラーはアルミ・コートされた20mm厚のシリコン・ミラーで、レーザー電子光ビームが対生成で減るのを避けるため、中央部に直径5mmの穴を設けている。また、X線からの入熱対策として、シリコン・ミラーを上下半割りにして3mmスリット構造としている他、ミラー背面の銅製ホルダーを水冷している。4レーザー光は四つ葉のクローバー型に上下ミラーで左右2つずつ当たるため、上記ミラー加工の影響はレーザー光の裾部分のみに抑えられている。

入射レーザーを長直線部電子軌道と衝突させるには、レーザー光軸の角度を精密に振る調整機構が必要である。そのため、レーザー入射室内の4光路それぞれに設置している合成石英ミラーを、遠隔操作できるステッピング・モーター付きステージに載せている。逆コンプトン散乱点付近のレーザー・スポットの確認は、長直線部途中(レーザー光が散乱点を約7m過ぎた地点)に設置したレーザー・モニター用チェンバーで行う。ここでは、電子ビーム軌道の上下にミラーを取り付けてレーザー光をビューポートから垂直に取り出し、アルミナ蛍光板上のスポットをCCDカメラ

で確認している。電子ビームによる壁電流が流れるよう、軌道上下のミラーはスリット構造をした格納部に収められている。

光子ビームの偏極度は、レーザー偏光度の測定を基に計算する。フロントエンド部のMOミラーを下ろしてレーザー光を真空チェンバーから取り出した後、偏光子を遠隔回転させながら強度変化をフォトダイオードで測定する。これを正弦曲線でフィットして偏光度を求める。偏極測定系は収納部内に設置している。

### 5. 付帯実験施設の整備

蓄積リング収納部内のスイープ磁石より下流は1Pa程度のビーム輸送パイプが配管され、約100mのビーム通過中に散乱、吸収が起ることを防いでいる。遮蔽壁直前にはビームシャッターが設置されている。この輸送パイプはリング棟実験ホールを突き抜け、最終的にLEPS2実験棟入口までつながっている。LEPS2実験棟は、放射線インターロックで管理された幅12m×奥行18m×高さ10mの建屋となっており、2011年3月に竣工した。実験棟最下流には、鉄のブロック及びコンクリートでできたビーム・ダンプを設けている。

LEPS2実験で用いる大立体角荷電スペクトロメーター系は、1Teslaの大型ソレノイド磁石(ボアの直径2.96m、長さ2.22m)中に建設する。大型磁石と検出器系最外殻のサンプリング・カロリメーターは、米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)で2004年まで静止K中間子稀崩壊実験E949に使われていた物を流用している。実験棟の建設と並行して、BNLでE949検出器の解体及び回路系の回収が行われ、これらの貴重な財産と重さ400トンのソレノイド磁石が日本へ海上輸送された。磁石はディスク状に分割されてLEPS2実験棟へ運び込まれ、**図5(a)**で示されている通り、2011年11月に建屋中央部にある深さ1.5mのピットへ移設された。現在、ボア内部に入る検出器群(大口径飛跡検出器や粒子識別検出器)の開発を進めている。

この荷電スペクトロメーター系が稼働するまでの間、実験棟の上流側スペースでは大立体角電磁カロリメーターBGOeggを中心としたセットアップで実験を行う(**図5(b)**参照)。BGOeggは、

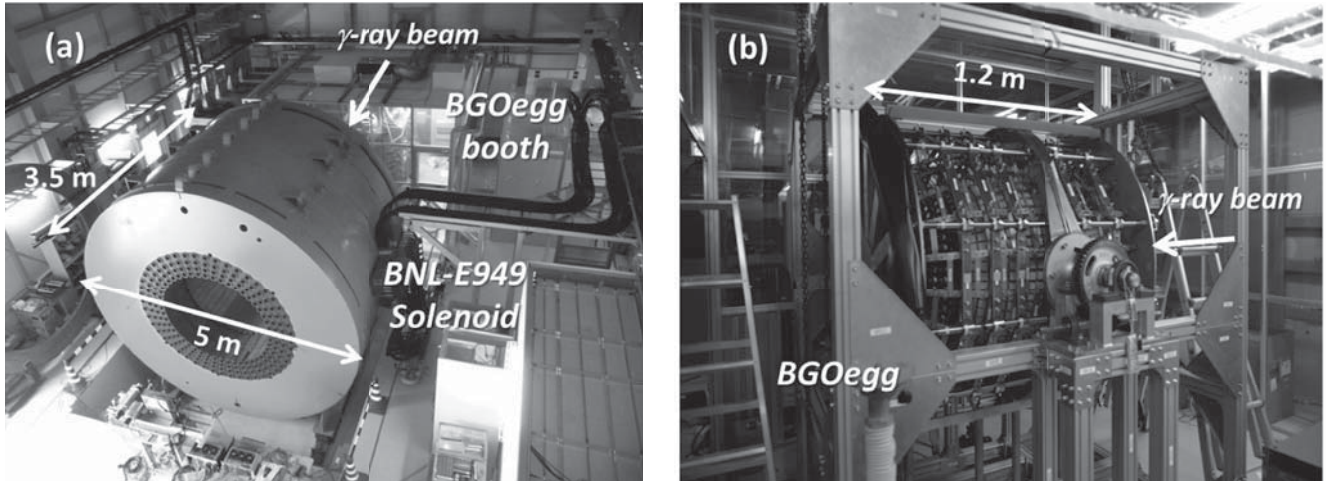


図5 (a) LEPS2 実験棟内の様子. BNL-E949 ソレノイド磁石が中央に据え付けられ, その上流側に BGOegg 用の恒温ブースが建てられている. (b) 電磁カロリメーター BGOegg の外観. この写真では下流前方部(左側)の 300 チャンネルのみ光電子増倍管が取り付けられている.

1320 本の BGO 結晶 (20 放射長の  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ) を卵型に組み上げた構造で, 1 GeV のガンマ線に対して世界最高レベルとなる 1.3% のエネルギー分解能を持つ. 東北大学電子光物理学研究センターで建設され, 2012 年 12 月に LEPS2 実験棟へ移送された. 検出器全体は恒温ブース内に設置され, 信号出力の温度依存 ( $-1.5\%/度$ ) を取り除く対策を施している. BGOegg カロリメーター系の他に, 時間分解能 60 psec で前方飛程時間の測定を行う高抵抗板チェンバー (RPC) や各種ドリフト・チェンバーなど, 荷電粒子検出系の整備も進んでおり, 2013 年秋以降に本格的な物理データの収集を開始する予定である.

## 6. ビーム・コミッショニング

### 6.1 光子ビーム生成までの経緯

ビームライン真空チェンバーは, 十分にベキキング (昇温脱離) が行われているにもかかわらず, 紫外レーザーを入射することによって真空度の悪化が見られた. そこで 2013 年 1 月に, レーザー入射位置を少しずつ変えながら光脱離させる脱ガスを正月返上で行った.

蓄積リングとの境界にある放射光アブソーバーを開けてフロントエンド部まで X 線及び制動放射光が導かれたのは, 2013 年 1 月 16 日早朝の加速器調整期間中である. 5 時間の割当て時間内に, 第 1 ミラーの温度上昇をモニターしながら長直線部の電子軌道を振り, ミラー・スリットに対

する放射光の軸出し調整を行った. 長直線部及びその前後の偏向電磁石付近の電子軌道は複数のステアリング磁石により幾つかに分けたバンプ軌道を作ることが可能であるが, この時の調整は放射光がフロントエンドにあるミラーの中心に来るようにバンプ軌道を調整することだけを行った. 同時に, 放射光によるマスクや M0 アブソーバーの焼き出しも済ませた.

そしていよいよ 1 月 27 日のマシンスタディ中の 12 時間の割り当てで, LEPS2 ビームラインへのレーザー入射が行われた. まず, ビームシャッターを開けて制動放射光ビームを LEPS2 実験棟まで出し, 安全管理室と共同で放射線レベルのサーベイを行った. その後, 24 W レーザー一台の入射が試みられ, 真空度の悪化をモニターしながら, スプリッターを用いて徐々に入射パワーを上げていった. LEPS2 実験棟で想定された軸より 10 mm 程下方にビーム中心があるものの, 24 W 出力を全入射した状態でエネルギー・スペクトルや光子ビーム強度の測定を行い, LEPS2 ビームラインにおけるレーザー電子光初生成が確認された.

この時点では, 第 1 ミラーの熱歪みによりレーザー焦点が想定より下流に動いたため, 予定していた箇所にある電子ビーム・バンプ軌道の補正でレーザー電子光ビームの詳細な軸出し調整することは断念した. そこで 4 月 2 日の加速器調整期間中に再び 4 時間のコミッショニング時間をもら

い, ミラー歪み分を考慮に入れた焦点距離を予め決めた上で, 電子軌道を振ると同時に LEPS2 実験棟におけるビーム・プロファイルをモニターし, レーザー電子光ビームの軸出しを行った. この際, 手持ちの紫外レーザー 3 台 (24 W 1 台, 16 W 2 台) の同時入射を行い, 光子ビーム性能の詳細を測定した.

### 6.2 得られた光子ビームの性能

図 6 (a) は, 3 レーザー光を入射した場合のレーザー電子光ビームと, 入射しなかった場合の制動放射光ビームのエネルギー・スペクトルを示している. この測定では, LEPS2 実験棟の光子ビーム軸上に直径 8 cm, 長さ 30 cm の大型 BGO 結晶 1 個を置き, 光電子増倍管で増幅された電磁シャワー信号の電荷量を ADC で読み出した. 信号のピルアップを抑えるため, レーザー電子光ビームと制動放射光ビームのスペクトルは, それぞれ電子ビームの電流値が 0.1 mA, 10 mA の時に測定している. そのため, 2 つのスペクトルは, 電流値, 測定時間, データ収集系の有効計数率で規格化されている. レーザー電子光ビームのエネルギー・スペクトルは, 蓄積リング収納部内に設置されているコリメーターにより, 散乱角度の広がった 0.65 GeV 以下の成分が除去されている. LEPS2 ビームラインは直線部が長いので, 残留ガスによる制動放射光強度が高くなるが, 図 6 (a) の比較から分かる通り, レーザー電子光ビームの強度が 2 桁程度優越している.

図 6 (b) (c) は, LEPS2 実験棟の光子ビーム軸

上で測定したビーム・プロファイルである. 3 mm 角のシンチレーション・ファイバーを縦 16 本, 横 16 本の二層に並べ, その上流に電子・陽電子対生成用の 0.5 mm 厚アルミ・コンバーターとトリガー・カウンターを配置したモニター (BPM) を使用した. 測定にあたって, エネルギー測定用の大型 BGO 結晶と BPM を入れ替えた. 制動放射光ビームのプロファイルは, 長直線部の電子軌道状態により, RMS が 9 mm 程度と少し広がっているが, レーザーを蓄積リングへ入射すると, 局所的に散乱が起こっているレーザー電子光ビームが優勢となり, 図 2 (b) から評価できる通り RMS が 6 ~ 7 mm 程度に絞られる結果となった.

通常, 光子ビーム強度はタギング検出器における反跳電子の検出レートから割り出されるが, タギング検出器の R&D と最適化が 2013 年夏の加速器停止期間まで続けられているため, 2 つの代替方法を用いて評価した. 一つは, レーザー入射前後の電子ビーム寿命の計測であり, その差が有意に観測された. 3 本のレーザー光を入射した場合, 逆コンプトン散乱による電流損失に相当する寿命は約 120 時間と評価され, 100 mA の電流値を基に計算された散乱レートは, 2.4 GeV までの全エネルギー領域で 7 MHz であった. 一方, LEPS2 実験棟に設置した BPM では, コンバーターにおける対生成レートが計測でき, 3 レーザー光の入射時は 29.0 kHz (制動放射光のみで 3.7 kHz) であった. コンバーター及びトリガー・カウンターにおける対生成断面積, ビームライン途中のアブ

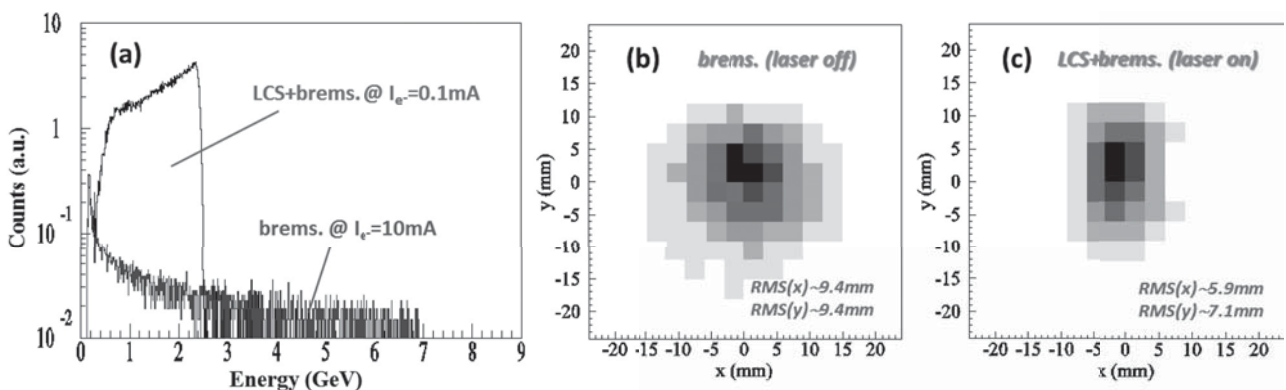


図 6 (a) レーザー光 3 本を入射した場合としなかった場合の光子ビームに対するエネルギー・スペクトル. それぞれ, 蓄積電子ビーム電流値が 0.1 mA と 10 mA の時に測定した. (b) は制動放射光ビームのみの場合, (c) はレーザー電子光ビームが生成されている場合の LEPS2 実験棟におけるビーム・プロファイル. 水平方向 (x) および垂直方向 (y) の拡がり幅も RMS で示されている.



ソーバーや真空チェンバー窓等における光子ビーム損失, コリメーターによる低エネルギー光子の除去を考慮すると, 逆コンプトン散乱レートはやはり 7 MHz 程度と評価された. 得られた光子ビーム強度は, 期待していた値の半分程度であったが, 今後の入射光学系見直し等により改善していく.

## 7. ま と め

本記事で詳述してきた通り, SPring-8 の第 2 レーザー電子光ビームラインは成功裏に稼働し始めた. 2013 年 2 月 21 日には, これを記念して LEPS2 ビームライン竣工式典を執り行うことができた. また, 2 月のユーザー・タイム中には, 電磁カロリメーター BGOegg を前方 300 チャンネルのみ部分稼働させ, 検出器中央に置いた厚さ 20 mm の炭素標的にレーザー電子光ビームを試験的に照射した. BGOegg で検出された 2 個のガンマ線に対して不変質量分布をプロットした結果, 図 7 のように,  $\pi^0$  中間子の光生成が確認されている.

BGOegg は 2013 年秋までに全 1320 チャンネルの光電子増倍管取付けと読出し回路系の整備を終え, LEPS2 ビームラインで最初の本格的な物理データ収集がスタートする予定である. 順次, 荷電粒子検出器系のインストールも進め, 一つの柱

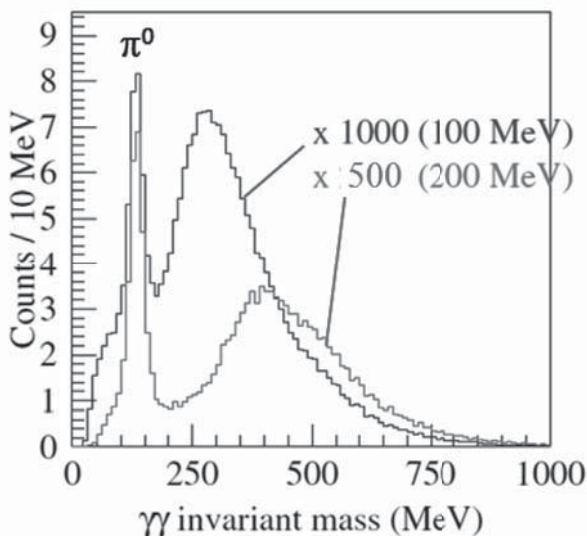


図 7 300 チャンネル部分稼働中の BGOegg で検出された 2 個のガンマ線の不変質量分布. 2 つのヒストグラムは, ガンマ線エネルギーの閾値を 100 MeV と 200 MeV にした場合を表す. それぞれにかかるスケール・ファクターも示す.

として  $\eta'$  中間子の光生成実験 (閾値 1.45 GeV) を行う.  $\eta'$  中間子は  $U_A(1)$  異常のため大きな質量を獲得していると考えられ, 原子核中でカイラル対称性の自発的破れが回復すると同時に質量が減少すると理論予想されている. その結果, 原子核中に束縛されてしまう. このような状態を探索することは, 質量起源の謎に迫る上でも重要なステップである. LEPS2/BGOegg 実験では, 永廣らの理論モデル<sup>14)</sup> に従うと, 20 mm 厚の炭素原子核に 4 MHz の標識化光子ビームを照射した場合, 超前方を覆う RPC で陽子を検出することによって, 一日当たり 1200 事象  $\times$  アクセプトランス分の束縛信号が観測される可能性がある. BGOegg カロリメーターで検出信号の S/N 比を改善していく.  $\eta'$  光生成の他にも, 複数中間子生成モードを通した高励起バリオン共鳴の探索などを行う予定であり, 構成クォーク模型を超えたハドロン構造の理解が深まると期待している.

LEPS2 ビームラインについても, 今後は第 1 ミラー形状や冷却方式の見直し, 光子ビーム通過領域の物質質量削減, タギング検出器のインストールなど, 改良を加えていく計画である. 開発されたタギング検出器で測定されるビーム光子のエネルギー分解能は, 長直線部の電子ビーム発散角が小さいおかげで 10 MeV 程度に良くなる予定である. また, 深紫外レーザー入射による高エネルギー光子ビームの大強度化も順次図っていくつもりである. ビームライン・パフォーマンスと物理成果の両面について, 今後の進展をご期待されたい.

LEPS2 ビームラインの建設・コミッショニングにあたっては, 公益財団法人高輝度光科学研究センター (JASRI) の加速器部門の方々から絶大なご協力をいただき, 深く感謝いたします. 予算的には, 大阪大学の運営費交付金や日本学術振興会の科研費, 新学術領域研究「新ハドロン」などの補助を受け, また, LEPS2 実験棟の建設は理化学研究所に全面的にサポートしていただきました. LEPS2 プロジェクトは, 大阪大学核物理研究センター, 東北大学電子光物理学研究センター, 公益財団法人高輝度光科学研究センター, 理化学研究所仁科加速器研究センター, 高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所, 京都大学理学研究科などの共同研究として進められています.

## 参考文献

- 1) D.I. Sober, et al., "The bremsstrahlung tagged photon beam in Hall B at JLab", Nucl. Instr. Meth. A 440 (2000), 263; B.A. Mecking, et al., "The CEBAF large acceptance spectrometer (CLAS)", Nucl. Instr. Meth. A 503 (2003), 513.
- 2) W.J. Schille, et al., "Design and construction of the SAPHIR detector", Nucl. Instr. Meth. A 344 (1994), 470; P. Grabmayr, "An experimental test of the GDH sum rule", Prog. Part. Nucl. Phys. 55 (2005), 375; D. Elsner, et al., "Linearly polarized photon beams at ELSA and measurement of the beam asymmetry in  $\pi^0$  photoproduction off the proton", Eur. Phys. J. A 39 (2009), 373.
- 3) H. Yamazaki, et al., "The 1.2 GeV photon tagging system at LNS-Tohoku", Nucl. Instr. Meth. A 536 (2005), 70; T. Ishikawa, et al., "The second GeV tagged photon beamline at ELPH", Nucl. Instr. Meth. A 622 (2010), 1.
- 4) E. Feenberg and H. Primakoff, "Interaction of Cosmic-Ray Primaries with Sunlight and Starlight", Phys. Rev. 73 (1948), 449.
- 5) R.H. Milburn, "Electron Scattering by an Intense Polarized Photon Field", Phys. Rev. Lett. 10 (1963), 75.
- 6) F.R. Arutyunian and V.A. Tumanian, "The Compton Effect on Relativistic Electrons and the Possibility of Obtaining High Energy Beams", Phys. Lett. 4 (1963), 176.
- 7) T. Nakano, et al., "Multi-GeV laser-electron photon project at SPring-8", Nucl. Phys. A684 (2001), 71c; N. Muramatsu, et al., "Development of High Intensity Laser-Electron Photon Beam up to 2.9 GeV at the SPring-8 LEPS Beamline", arXiv:1308.6453 (2013), Submitted to Nucl. Instr. Meth. A.
- 8) O. Bartalini, et al., "Results from the Graal Experiment", Prog. Part. Nucl. Phys. 44 (2000), 423.
- 9) G. Blanpied, et al., " $N \rightarrow \Delta$  transition and proton polarizabilities from measurements of  $p(\gamma, \gamma)$ ,  $p(\gamma, \pi^0)$ , and  $p(\gamma, \pi^+)$ ", Phys. Rev. C64 (2001), 025203.
- 10) N. Muramatsu, "GeV Photon Beams for Nuclear/Particle Physics," arXiv:1201.4094 (2012) の Section 2.6 にまとめられている.
- 11) T. Nakano, et al., "Evidence for the  $\Theta^+$  in the  $\gamma d \rightarrow K^+ K^- pn$  reaction by detecting  $K^+ K^-$  pairs", Phys. Rev. C 79 (2009), 025210; N. Muramatsu, "Recent Progress and Results of LEPS, LEPS2, and ELPH", Few-Body Syst. 54 (2013), 997; Y. Kato, "New Result on  $\Theta^+$  from LEPS", Few-Body Syst. 54 (2013), 1245.
- 12) S.H. Hwang, et al., "Spin-Density Matrix Elements for  $\gamma p \rightarrow K^{*0} \Sigma^+$  at  $E_\gamma = 1.85 - 3.0$  GeV with Evidence for the  $\kappa(800)$  Meson Exchange", Phys. Rev. Lett. 108 (2012), 092001.
- 13) M. Yosoi, "LEPS2: the second Laser-Electron Photon facility at SPring-8", AIP Conf. Proc. 1388 (2011), 163; T. Yorita et al., "Production of Intense High Energy Gamma Beam for LEPS2 Project at SPring-8", Proc. of the 4th International Particle Accelerator Conf. (IPAC2013), p2162 (2013); N. Muramatsu, "First Beam Observation and Near Future Plans at SPring-8 LEPS2 Experiments", arXiv:1307.6411 / ELPH Report 2044-13 (2013).
- 14) H. Nagahiro, et al., " $\eta$ - and  $\eta'$ -mesic nuclei and  $U_A(1)$  anomaly at finite density", Phys. Rev. C74 (2006), 045203.