

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月24日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2012

課題番号：21340070

研究課題名（和文） 新型レーザー光蓄積空洞による高速偏極スイッチング高効率ガンマ線源の実現

研究課題名（英文） Development of a three dimensional four mirror optical cavity for laser-Compton scattering

研究代表者

大森 恒彦 (OMORI TSUNEHIKO)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師

研究者番号：80185389

研究成果の概要（和文）：4枚のミラーを立体的に配置する全く新しい着想の「3D・4枚ミラー・リング型レーザー光蓄積空洞」を設計、製作し、その性能を確認した。このレーザー光蓄積空洞はレーザー・コンプトン散乱にもとづいた高強度・高エネルギー光子源に用いるためのものである。開発されたレーザー光蓄積空洞ではフィネス約 4000、蓄積パワー 2.6 kW、レーザー光・電子衝突点での垂直スポットサイズ  $13 \pm 1$  ミクロン(RMS)が実現された。このレーザー光蓄積空洞を使ってビーム衝突一回あたり  $124 \pm 1$  個の光子の生成が確認された。これは毎秒  $2.7 \times 10^8$  個の光子生成に相当する。生成された光子の平均エネルギーは 24 MeV である。

研究成果の概要（英文）：We made the design, fabrication, and performance test of a three-dimensional 4-mirror optical cavity for development of intense photon sources by laser-Compton scattering. We achieved the finesse of 4000 and average power of 2.6 kW in the cavity with the vertical laser beam spot size of  $13 \pm 1 \mu\text{m}$  in RMS at the laser-electron interaction point. As a result, we observed  $124 \pm 1$  photons with average energy of 24 MeV per beam crossing, which corresponds to the generation of  $2.7 \times 10^8$  photons per second.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2010年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2011年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2012年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：高エネルギー物理学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：加速器、国際リニアコライダー、コンプトン散乱、量子ビーム、ILC

## 1. 研究開始当初の背景

高強度の偏極ガンマ線/X線ビームは高エネルギー物理実験、原子核実験、物性実験など多くの分野で有力な実験手段として期待される。素粒子物理学の分野で計画中的国際リニアコライダー ILC では、偏極ガンマ線から生成した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、バックグラウンド事象を大幅に抑制させる事が出来る。また一般に生成された新粒子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。物性物理の分野では、偏極X線により物質中の電子のスピンの磁気能率と軌道磁気能率の分布の観測が可能になり、巨大磁

気抵抗効果のより深い理解などが期待できる。我々は ILC の偏極陽電子源として、円偏光レーザーと電子ビームを衝突させ高強度の偏極ガンマ線を作るコンプトン方式を提案している。高強度のガンマ線/X線ビーム生成の為には、レーザー光と電子ビームの衝突効率を上げることが必須である。

## 2. 研究の目的

4枚のミラーを立体的に配置する全く新しい着想の「3D・4枚ミラー・リング型レーザー光蓄積空洞」を開発する。それを高エネルギー加速器研究機構(KEK)の電子蓄積リングに挿入し、コンプトン散乱による高強度・偏極ガンマ線生成を実証する。我々はこの研究以前に、科学研究費補助金を得て、レーザー光蓄積空洞の開発を行なっており、スポットサイズ 30 ミクロンの空洞が完成している。その研究を進める中で、格段と性能を向上できる新型空洞の着想を得た。新型空洞では蓄積増倍率の増加、従来の半分程度のスポットサイズが達成可能である。空洞のガンマ線生成数は、蓄積増倍率に比例し、スポットサイズの2乗に逆比例する。つまり新型空洞は現在の空洞を大幅に上回るガンマ線生成数を持つ。この空洞はX線生成にもそのまま適応でき、極めて広い応用範囲を持つ。また極めて高速の偏極スイッチングが出来る。

## 3. 研究の方法

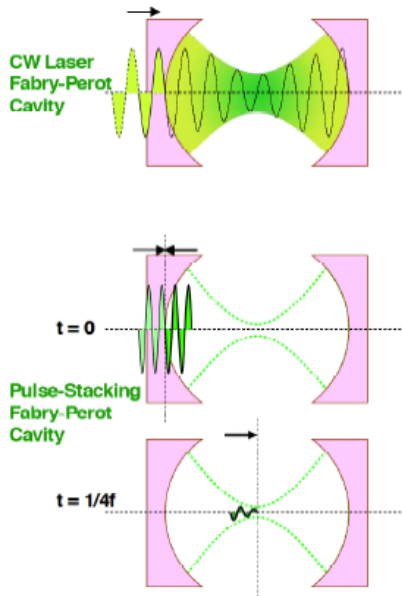


図1

図1にレーザー光蓄積空洞の原理を示す。一番上が CW レーザーの場合、下の2つがパルスレーザーの場合である。最も簡単な2枚ミラー型レーザー蓄積空洞はファブリーペロ型光共振器であり、レーザー光を入射すれば2

つのミラー間で反射を繰り返し、レーザー光は閉じ込められる。ミラー間の距離を精度良く制御し、全ての波の位相を揃えれば閉じ込められた光の振幅は何倍にも「増倍」される。本研究のパルスレーザー光蓄積空洞は、CWでなくパルス化された光を入射して振幅を増大する装置である。位相の共鳴条件が満たされ、かつ蓄積空洞長 ( $L_{\text{蓄積空洞}}$ ) とパルス間隔が一致 (整数倍) すれば、蓄積空洞中において光の強度が増大する。パルスレーザーとしてはモードロックレーザーを用いる。モードロックレーザーのパルス間隔は、その発信器の空洞長 ( $L_{\text{レーザー}}$ ) で決まる。レーザー波長を  $\lambda$  とすれば、蓄積空洞が満たすべき、(1)位相の共鳴条件と(2)パルス間隔の条件は下記の式で示される。(n, m は適当な整数)

- (1)  $L_{\text{蓄積空洞}} = n \lambda / 2$
- (2)  $L_{\text{蓄積空洞}} = m L_{\text{レーザー}}$

(1) の条件は、CW、パルス、いずれの蓄積においても満たすべき条件である。(2) はパルスレーザー蓄積に特有の条件である。

条件(1)(2)を満たす為に空洞を構成するミラーはピエゾ素子によってその位置を精密に制御出来るよう設計する。その為のフィードバックは、空洞の前後で反射光位相と透過光強度をモニターする事により行う。この技術は、KEK ATF で過去数年にわたり行われてきたレーザーワイヤー・ビームモニターの開発、および平成 18-20 年度に行なわれたガン

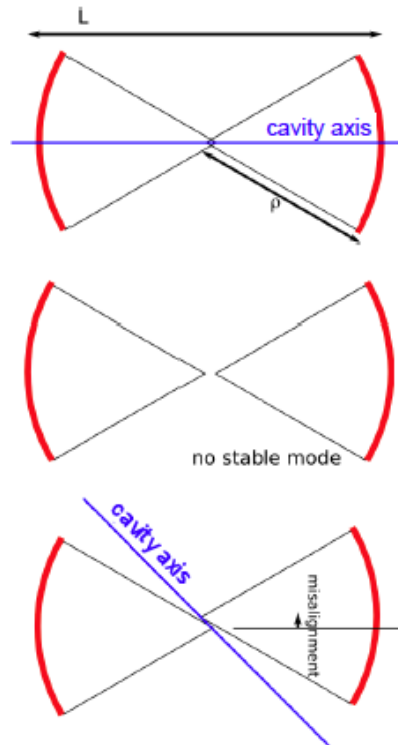


図2

マ線生成実験により培われてきた。本研究では、これまでの成果をふまえ、さらに格段と進歩させる為に3D構成の4枚ミラー・リング型空洞を開発する。

空洞に蓄積される光のモードはミラーの作る境界条件により決まる。最も簡単な球面ミラー2枚の空洞を考えるとミラーの曲率半径 $\rho$ とミラー間隔 $L$ の2つのパラメーターにより蓄積される光のモードが決定される。小さなスポットサイズを実現する為には $L-2\rho < 0$ を満たす範囲で $\rho$ をぎりぎりまで小さくする必要がある(図2の一番上)。 $L-2\rho > 0$ は解無し、つまり安定なモードが無い(図2の真ん中)。このぎりぎりの設計はアライメントの許容値に非常に厳しい制約を与える。空洞の軸は2つの球面の中心を結ぶ線で決まるが2つの中心は大変接近しているため、わずかなアライメント誤差が光軸を大きく傾ける(図2の一番下)。

これは高蓄積率の空洞を安定に動作させる上での制約となっている。また $L$ は共鳴条件により固定されているので自由に選べるパラメーターは $\rho$ だけである。スポットサイズは $\rho$ の僅かな製造誤差に大きく依存してしまう。この問題を打開する鍵が4枚ミラー・リング型空洞である(図3)。

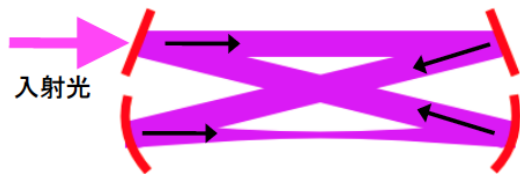


図3

この空洞は球面ミラー2枚と平面ミラー(または非常に曲率の小さいミラー)2枚の計4枚のミラーを使い、レーザーから入射した光が空洞内を周回しながら蓄積される。

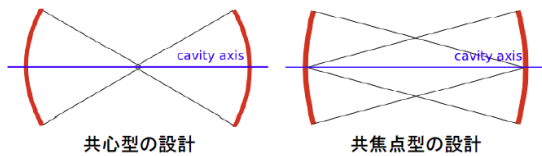


図4

2枚ミラー空洞では大きく発散しつつある光が球面ミラーに入射する(図4の左側)が、4枚ミラー空洞では球面ミラーには(ほぼ)平行な光が入射する。このため球面ミラーの曲率半径を2つの球面ミラーの間隔と同じにする事が出来る(図4の右側)。この設計では空洞の軸を決める2つの球面の中心は十分離れているので、アライメント誤差に対する光軸の安定性は極めて高い。

2枚ミラー空洞で共焦点型の設計を行なえば、スポットサイズ(焦点サイズ)は極めて大きなものになってしまう。しかし4枚ミラー空洞では平面ミラー間に非常に大きな焦点が出来、そのため球面ミラーには、(ほぼ)平行な光が入射するので、共焦点型の設計を行なっても、2つの球面ミラー間に出来る焦点のサイズを十分に小さくできる。

4枚ミラー空洞の弱点はミラーへの光の入射が僅かではあるが斜めになる事である(図5)。この為、単純に平面上に4枚のミラーを並べただけ(「2D構成」)ではタンジェンシャル平面とサジタル平面での実効的焦点距離( $f_t, f_s$ )が異なる、非点収差が発生する、両平面を同時に限界まで絞る事が出来ない、などの問題をもつ。また偏光に関しても度重なる斜め入射によりS波の間にP波大きな位相差が出来てしまい、円偏光を維持できない。

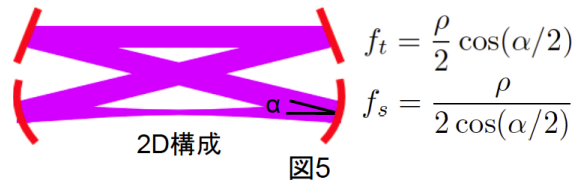


図5

この解決の為、本研究では4枚のミラーの配置に「ひねり」をくわえ3次元的に配置した「3D構成」の4枚ミラー空洞を提案する(図6)。これによりタンジェンシャル平面とサジタル平面が交互に入れ替わり、両平面が同等となり、焦点のスポットを丸にできる。偏光に関してもS波とP波が交互に入れ替わる為、位相差がキャンセルされ高い円偏光を維持できる。

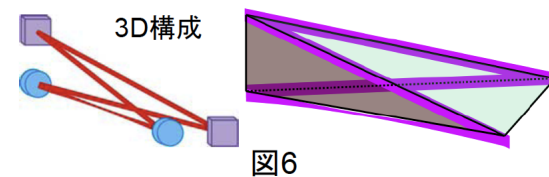


図6

#### 4. 研究成果

研究ではまず大気中で動作する4枚ミラー空洞を試作して様々なテストを行なった。このテストから真空中で使う空洞に最適な機械的構造を決定した。また理論的研究の成果からミラーのひねり角は90度ではなく、すこしズラしたほうが、より安定に小さなスポットが達成出来る事が判明し、真空対応の実機では91.2度とした。これらの成果を元に制作された4枚ミラー空洞を図7に示す。

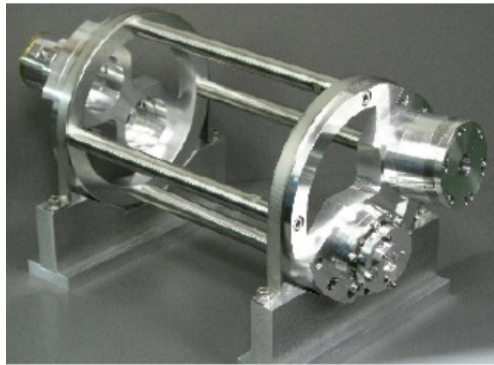


図7

空洞の中のレーザー光の光路を図8に赤矢印で示す。ひねり角は図8の右にあるように91.2度である。この空洞を真空容器の中に納め、精密可動式架台の上に設置し KEK の先端加速器試験装置(ATF)の電子蓄積リングに設置した(図9)。

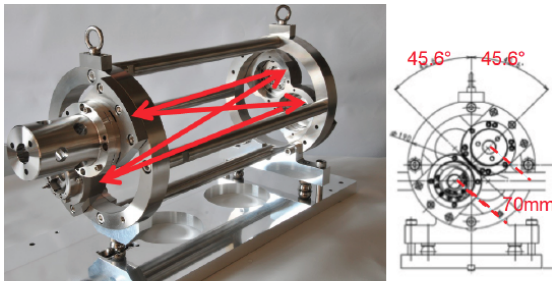


図8

設置後はフィードバック機構、レーザーなどの調整を行ないレーザー光の蓄積を確認した。平均パワー 2.6 kW を安定に蓄積する事が出来た。フィネスは 4040 $\pm$ 100、蓄積増倍率は 1200 であった。蓄積パワーのふらつきは 1.4% (RMS) であった(図10)。これはフィードバックにより周長 1.62 m のリング型空洞の周長が 8  $\mu$ m の精度(RMS)で制御されたことを意味する(ミラーの位置制御の精度に換算すると 4  $\mu$ m)。

完成したレーザー光蓄積空洞を用いてガンマ線生成実験を行なった。ビーム衝突一回あたり 124 $\pm$ 1 個の光子の生成が確認された(図11)。これは毎秒 2.7 $\times$ 10<sup>8</sup> 個の光子生成に相当する。生成された光子の平均エネルギーは 24 MeV である。

一連の試験を通じて新しい3D4枚ミラー・レーザー光蓄積空洞は極めて小さなスポットサイズを長期間安定に維持する事が実証された。今回実現した垂直スポットサイズ、13 ミクロン、は従来の2枚ミラーキャビティで実現していた値、30 ミクロン、の半分以下である。それにもかかわらず試験期間を通じて、光軸ズレにより蓄積空洞と外部のレーザー光路のマッチングが失われた事は

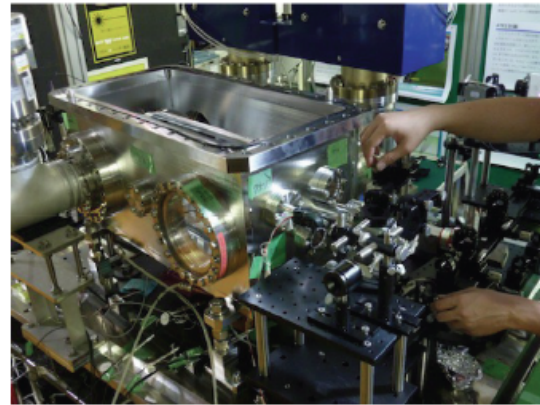


図9

度もない。2枚ミラー空洞ではマッチングが失われる事象が年に1~2回程度起きていた事と比べると、4枚ミラー空洞の安定性がよく判る。

上述した4枚ミラー化による光学的安定性の向上に加えて、フィードバック回路の改良により、蓄積パワーの安定度は 1.4% となった。これは従来に比べて一桁以上の向上である。この結果から外挿すると現在の装置(4枚ミラー空洞+フィードバックシステム)は基本的には1万倍以上の蓄積増大率を達成する事が可能と考えられる。

一連の実験では、将来よりいっそうの高度化をめざす時に改良すべき点も明らかになった。その一つはミラー表面でのパワーロスである。現状は4枚のミラーの合計で約 1W のパワーがミラー表面で失われている。これは蓄積パワー 2.6 kW の 0.05% 以下なので無視しうる値のように思えるが、そうではない。このパワーロスによってミラーが熱変形する事が蓄積光のプロファイルの時間変化等によって確認されている。現状を超えた蓄積パワー、蓄積増大率を実現する為にはミラー表面でのロスを大幅に低減する必要がある。このパワーロスはミラーを空洞に組み込む過程での表面のごく僅かの汚染に起因すると考えられる。この汚染を防止する事の出来る組み込み過程を研究する必要がある。

もう一つ必要な改良は空洞内のミラーのアライメントである。透過光の観測から蓄積空洞の焦点でのプロファイルは完全な円ではないことが分かっている。この円からのズレは空洞内のミラーのアライメントが不十分である事に起因していると推察される。完全な円形プロファイルと、さらに小さなスポットサイズをめざす為には、アライメント機構の更なる高度化が必要である。

<まとめ>

4枚のミラーを立体的に配置する全く新し

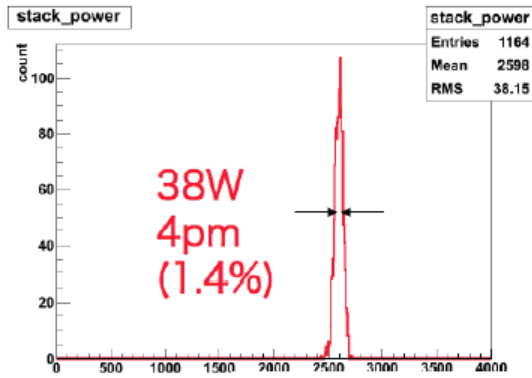


図10

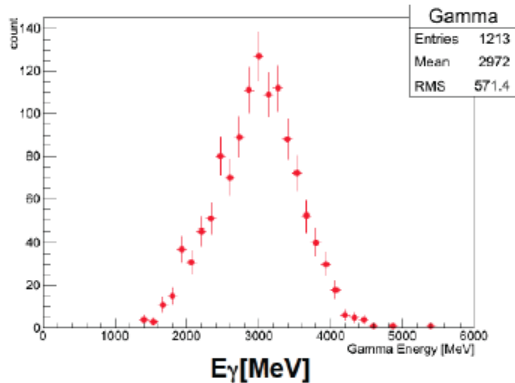


図11

い着想の「3D・4枚ミラー・リング型レーザー光蓄積空洞」を設計、製作し、その性能を確認した。開発されたレーザー光蓄積空洞ではフィネス約 4000、蓄積パワー 2.6 kW、レーザー光・電子衝突点での垂直スポットサイズ  $13 \pm 1$  ミクロン(RMS)が実現された。蓄積パワーの安定度は 1.4 % であった。これは従来の我々の空洞に比べて一桁以上の向上である。このレーザー光蓄積空洞を使ってビーム衝突一回あたり  $124 \pm 1$  個の光子の生成が確認された。これは毎秒  $2.7 \times 10^8$  個の光子生成に相当する。実現したスポットサイズ、13 ミクロンは、は従来の2枚ミラー空洞の半分以下であるにもかかわらず光学的安定度は極めて高く4枚ミラー空洞の利点を実証された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

① ”Development of a three dimensional four mirror optical cavity for laser-Compton scattering” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Volume 724, 1 October 2013, Pages 63-71 査読有り T. Akagi, S. Araki, Y. Funahashi, Y. Honda, H. Kataoka, T. Kon,

S. Miyoshi, T. Okugi, T. Omori, K. Sakaue, H. Shimizu, T. Takahashi, R. Tanaka, N. Terunuma, J. Urakawa, M. Washio, H. Yoshitama

② “Multi Bunch Gamma Ray Generation Experiment at ATF”, Proceeding of the 6<sup>th</sup> Annual Workshop POLARIZED POSITRON (Posipol) 2011, World Scientific Publishing 2013. Editor: Wei Gai 査読無し. T. Takahashi

③ “Compton  $e^+$  Source Overview”, Proceeding of the 6<sup>th</sup> Annual Workshop POLARIZED POSITRON (Posipol) 2011, World Scientific Publishing 2013 Editor: Wei Gai 査読無し, J. Urakawa

④ “Production of gamma rays by pulsed laser beam Compton scattering off GeV-electrons using a non-planar four-mirror optical cavity”, Journal of instrumentation Vol 7 No 1 (2012) P0102, 査読有り, T. Akagi, S. Araki, J. Bonis, I. Chaikovska, R. Chiche, R. Cizeron, M. Cohen, E. Cormier, P. Cornebise, N. Delerue, R. Flaminio, S. Funahashi, D. Jehanno, Y. Honda, F. Labaye, M. Lacroix, R. Marie, C. Michel, S. Miyoshi, S. Nagata, T. Omori, Y. Peinaud, L. Pinard, H. Shimizu, V. Soskov, T. Takahashi, R. Tanaka, T. Terunuma, J. Urakawa, A. Variola, F. Zomer

[学会発表] (計 18 件)

① 2013 年 3 月 29 日、日本物理学会、広島大学、「レーザーCompton 散乱による光子ビーム生成実験へのデジタル制御システムの組み込み」、広島大、高エ研 A、早大 B、吉玉仁、赤木智哉、荒木栄 A、浦川順治 A、大森恒彦 A、奥木敏行 A、栗木雅夫、坂上和之 B、清水洋孝 A、高橋徹、田中龍太、照沼信浩 A、舟橋義聖 A、本田洋介 A、鷲尾方一 B

② 2013 年 3 月 29 日、日本物理学会、広島大学、「偏極陽電子源の為のレーザーCompton 散乱によるガンマ線生成実験」、広島大、高エ研 A、早大 B、田中龍太、赤木智哉、荒木栄 A、浦川順治 A、大森恒彦 A、奥木敏行 A、栗木雅夫、坂上和之 B、清水洋孝 A、高橋徹、照沼信浩 A、舟橋義聖 A、本田洋介 A、吉玉仁、鷲尾方一 B

③ 2012 年 09 月 14 日、日本物理学会、京都産業大学、「次世代小型高輝度光子ビーム源の為のデジタルフィードバックシステムの開発」、広島大、高エ研 A、早大 B、成蹊大

C、吉玉仁、赤木智哉、荒木栄 A、浦川順治 A、大森恒彦 A、奥木敏行 A、片岡裕美 C、栗木雅夫、坂上和之 B、清水洋孝 A、高橋徹、田中龍太、照沼信浩 A、舟橋義聖 A、本田洋介 A、鷺尾方一 B

④ 2012 年 09 月 14 日、日本物理学会、京都産業大学、「ILC 偏極陽電子源の為のレーザー蓄積共振器の開発」、広島大、高エ研 A、早大 B、田中龍太、赤木智哉、荒木栄 A、浦川順治 A、大森恒彦 A、奥木敏行 A、栗木雅夫、坂上和之 B、清水洋孝 A、高橋徹、照沼信浩 A、舟橋義聖 A、本田洋介 A、吉玉仁、鷺尾方一 B

⑤ PosiPol\_2012, 4-7 September 2012, DESY Zeuthen, Germany “Experiment of the 4-Mirror Compton cavity at KEK-ATF”, T. Takahashi (Hiroshima U.)

⑥ PosiPol\_2012, 4-7 September 2012, DESY Zeuthen, Germany, “Recent progress for 4-Mirror Compton cavity at KEK”, J. Urakawa (KEK)

⑦ 2012 年 8 月 8 日～11 日、第 9 回日本加速器学会年会、大阪大学、「次世代小型高輝度光子ビーム源の為のデジタルフィードバックシステムの開発」、吉玉 仁、赤木 智哉、栗木 雅夫、高橋 徹、田中 龍太 (以上、広島大)、荒木 栄、浦川 順治、大森 恒彦、奥木 敏行、清水 洋孝、照沼 信浩、舟橋 義聖、本田 洋介 (以上、高エネ研)、坂上 和之、鷺尾 方一 (以上、早大)

⑧ 2012 年 8 月 8 日～11 日、第 9 回日本加速器学会年会、大阪大学、「3 次元 4 枚鏡レーザー蓄積共振器を用いたガンマ線生成実験-マルチバンチガンマ線生成-」、赤木 智哉、栗木 雅夫、高橋 徹、田中 龍太、吉玉 仁 (以上、広島大)、荒木 栄、浦川 順治、大森 恒彦、奥木 敏行、清水 洋孝、照沼 信浩、舟橋 義聖、本田 洋介 (以上、高エネ研)、坂上 和之、鷺尾 方一 (以上、早大)

⑨ 2012 年 3 月 26 日、日本物理学会、関西学院大学、「ILC 偏極陽電子源の為の 4 枚鏡共振器の開発 ～マルチバンチガンマ線検出～」、成蹊大、高エ研 A、広島大 B、早大 C、片岡裕美、赤木智哉 B、荒木栄 A、浦川順治 A、大森恒彦 A、奥木敏行 A、栗木雅夫 B、近匡、坂上和之 C、清水洋孝 A、高橋徹 B、田中龍太 B、照沼信浩 A、舟橋義聖 A、本田洋介 A、吉玉仁 B、鷺尾方一 C

⑩ 2012 年 3 月 26 日、日本物理学会、関西学院大学、「ILC 偏極陽電子源の為の 4 枚鏡共振器の開発～共振器の共鳴維持制御技術～」

広島大、高エ研 A、早大 B、成蹊大 C、田中龍太、赤木智哉、荒木栄 A、浦川順治 A、大森恒彦 A、奥木敏行 A、片岡裕美 C、栗木雅夫、近匡 C、坂上和之 B、清水洋孝 A、高橋徹、照沼信浩 A、舟橋義聖 A、本田洋介 A、吉玉仁、鷺尾方一 B

⑪ PosiPol\_2011, August 28-30, 2011, IHEP, Beijing, China, “Compton e+ source overview”, J. Urakawa (KEK)

⑫ PosiPol\_2010, 31 May - 2 Jun, 2010, KEK, Japan, “Compton Programs in KEK”, J. Urakawa (KEK)

⑬ PosiPol\_2009, June 24, 2009, University Lyon, France, “4-mirror Compton project in Japan”, T. Takahashi (Hiroshima U.)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大森 恒彦 (OMORI Tsunehiko)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師  
研究者番号：80185389

### (2) 研究分担者

本田 洋介 (HONDA Yousuke)

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・助教  
研究者番号：40509783

### (3) 連携研究者

浦川 順治 (URAKAWA Jyunji)

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・教授  
研究者番号：00160333

高橋 徹 (TAKAHASHI Tohru)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・准教授  
研究者番号：50253050

鷺尾 方一 (WASHIO Masakazu)

早稲田大学・理工学術院・教授  
研究者番号：70158608