

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23561018

研究課題名(和文)単色ガンマ線源のための光蓄積装置の開発

研究課題名(英文)Development of an asymmetric optical resonator for the monochromatic gamma-ray source

研究代表者

永井 良治(NAGAI, Ryoji)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・研究主幹

研究者番号：40354906

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：レーザーコンプトン散乱(LCS)による高輝度ガンマ線源は原子核共鳴散乱を用いた非破壊検査装置にとって非常に有用なプローブであり、単色LCS光源の開発により非破壊検査の劇的な精度向上が図れる。LCS光源の単色性は短パルスレーザーのエネルギー広がりによって制限されるので、狭帯域レーザーを用いる必要がある。本研究では、狭帯域レーザーに適した光蓄積装置の開発を行った。光蓄積装置として非対称ファブリペロー共振器を提案し、光蓄積装置として機能させるためには、その共振器を放物面鏡により構成する必要があることが明にされた。また、鏡の加工誤差やミスアライメントの影響についてレイトレース法を用いて評価した。

研究成果の概要(英文)：A high intensity monochromatic gamma-ray source from the laser Compton scattering (LCS) is a very useful probe for a nondestructive assay system by means of nuclear resonance fluorescence. The accuracy improvement of the measurement system is attained by further developing a pure monochromatic LCS source. Since, the monochromaticity of the LCS light source is restricted by the energy spread of the mode-locked short pulse laser, an ultra-narrow band width laser should be used for instead of the short pulse laser. An enhancement cavity for the pure monochromatic LCS source has been developed in this study. An asymmetric confocal Fabry-Perot optical resonator was proposed as an enhancement cavity of the pure monochromatic LCS source. In the result of the study, it was shown clearly that the mirrors of the asymmetric optical resonator should be parabolic mirrors. The influences due to the distortion and the misalignment of the mirrors were evaluated by a raytrace method.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：レーザーコンプトン散乱 光共振器 放物面鏡 単色ガンマ線源

1. 研究開始当初の背景

近年、単色ガンマ線源の必要性が高まっている。例えば、原子核共鳴散乱による同位体を非破壊で分析する技術[1]、[2]、ガンマ線CT[3]である。単色ガンマ線は電子ビームとレーザー光によるレーザーコンプトン散乱により得られる。レーザーコンプトン散乱では散乱角度と散乱された光のエネルギーの間に相関があり、コリメータで特定の角度成分だけを切り出すことで単色ガンマ線を得ることができる。しかし、現在の技術では電子ビームのエネルギー広がりやレーザー光のスペクトル線幅の影響で散乱光のエネルギーが混ざってしまうために、 10^2 より狭い線幅の単色ガンマ線を得ることは困難である[4]。そのため、高輝度単色ガンマ線を得るには単色エネルギーの高輝度電子ビームの生成と狭帯域レーザーの光蓄積技術の開発が必要である。

レーザーコンプトン散乱によるガンマ線の発生では、電子ビームとレーザー光の殆どは衝突せずにすり抜けてしまうので、レーザー光を繰り返し効率よく利用するための光蓄積装置[5]が必須である。これまでの光蓄積装置は光蓄積装置の共振周波数と同じ繰り返し周波数の数 ps のパルスレーザー光を透過率の小さい半透過鏡を使用したファブリペロー型共振器中に蓄積して 1000 倍以上に増倍している[6]。一方、注入同期チタンサファイアレーザーのようなスペクトル線幅が 10^8 程度の狭帯域レーザーのパルス幅は数十 ns 以上であり、このようなレーザーの繰り返し周波数は数 kHz 程度である。通常的光蓄積装置に低繰り返し狭帯域レーザーを入射するとその繰り返し毎に 10 倍程度までしか増倍されず十分に機能しない。従って、高輝度単色ガンマ線源を実現するには、低繰り返し狭帯域レーザー光を 1000 倍程度以上に増倍する光蓄積装置を開発する必要がある。

- [1] W. Bertozzi and R. J. Ledoux, Nucl. Instrum. Meth. B 241, 820-825 (2005).
- [2] J. Pruet, et al., J. Appl. Phys. 99, 123102 (2006).
- [3] H. Toyokawa, et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 55, 3571-3578 (2008).
- [4] <http://www.tunl.duke.edu/pdfs/HIGSPerformance.pdf>
- [5] A. Moon, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 36, L1446-L1448 (1997).
- [6] A. Variola, et al., "THOMX Conceptual Design Report", SOLEIL/SOU-RA-2678, pp47-59 (2010).

2. 研究の目的

ガンマ線を利用した原子核共鳴散乱による非破壊分析の高精度化などの、より高度のガンマ線利用分析の実現に必要な高輝度単色ガンマ線を生成するための技術として、非対称共焦点型ファブリペローにより、狭帯域レ

ザーの蓄積による光蓄積増倍技術の研究開発を行う。

3. 研究の方法

従来の光蓄積装置において、低繰り返し狭帯域レーザーを増倍できない理由は、低透過率の半透過鏡でレーザーを入射しているためにレーザー光を蓄積する時間がかかり、低繰り返しレーザーでは次のパルスが入射されるまでに蓄積光が減衰してしまうためである。(図1参照)そこで、低繰り返し狭帯域レーザーを増倍するためには、半透過鏡を用いず、入射光全量を入射できるような光共振器(図2参照)によりレーザー光を蓄積すれば図3に示すように 1000 倍以上の増倍が得られる。

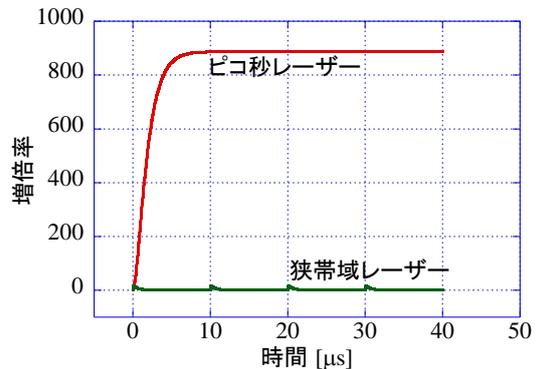


図1. ピコ秒高繰り返しレーザーと狭帯域低繰り返しレーザーの従来型光蓄積装置での増倍率の比較

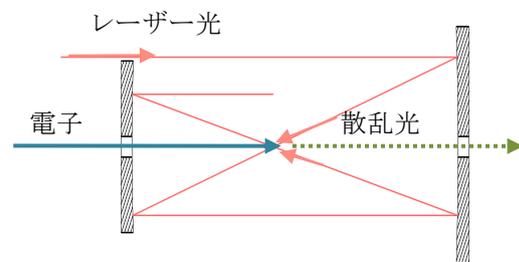


図2. 非対称共焦点型ファブリペローによる光蓄積

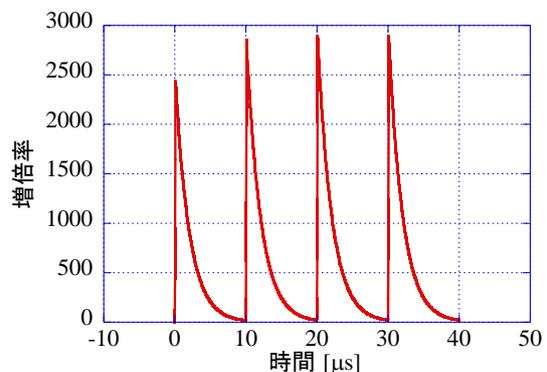


図3. 狭帯域低繰り返しレーザーの本課題で提案する光蓄積装置での増倍率

上述の光蓄積装置（光共振器）の開発を以下のように行う。

- (1) レイトレイス法による数値計算により光共振器の設計・評価手法を確立する。
- (2) 設計に基づき光共振器を製作し、光蓄積技術を確立する。
- (3) 光共振器を電子ビーム試験装置のビームラインに組み込み、電子銃で生成した電子ビームによる散乱実験により光共振器の性能を実証する。

4. 研究成果

非対称型ファブリペロー共振器の設計をレイトレイス法に基づく数値計算により行った。実際の光共振器が容易に製作できるように、共振器長 300mm、センターホール直径 8mm、焦点距離 154mm と 146mm、レーザー光の往復回数 30 回程度というようなパラメータで検討した。その結果、通常の光共振器で用いられている球面ミラーでは球面収差により収束出来なことが分かった。図 4 に共振器内のレーザー光の軌道と焦点位置でのプロファイルを示す。

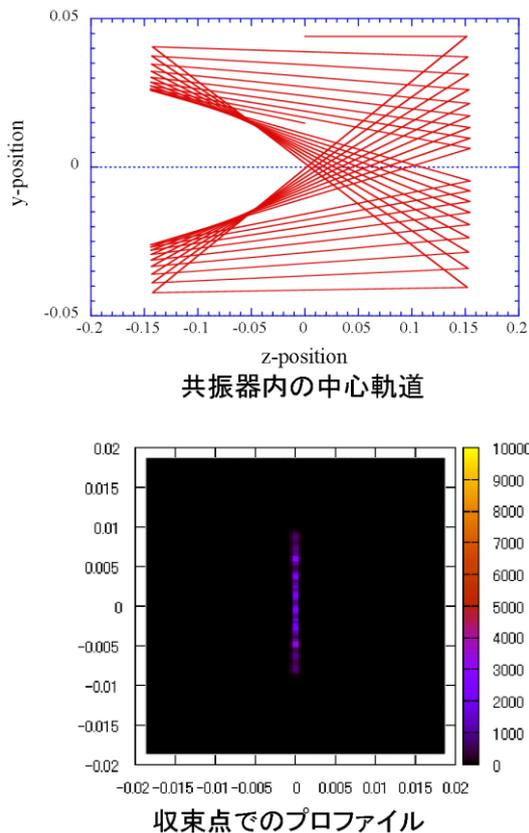


図 4. 球面ミラーを用いた非対称型ファブリペロー共振器のレイトレイス法による評価結果

このような共振器ではミラーの中心を大きく外れた部分を使用するので、球面収差が非常に大きな問題となることが分かった。そこで、共振器長を変化させての球面収差の緩和について調査した。その結果を図 5 に示す。焦点位置での収束について改善がみられた

が、まだプロファイルが縦長で十分に球面収差が緩和できたとは言い難い状態である。

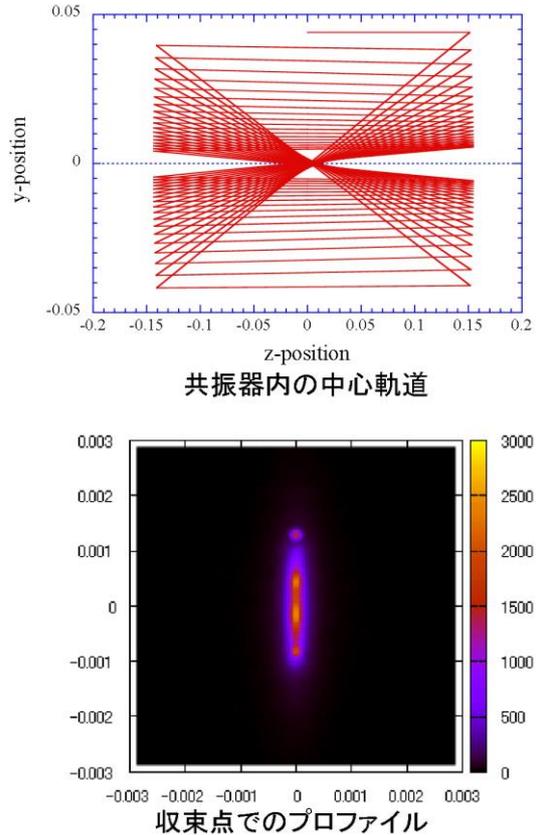


図 5. 球面ミラーを用いた非対称型ファブリペロー共振器の収束性の改善

また、球面ミラーに起因する問題として、共振器内を往復するレーザー光の周回距離の変動があることも分かった。光共振器でレーザー光を蓄積し増倍させるには往復する光の位相整合が十分にとれていること、即ち、光共振器内を往復する光の周回距離は一定でなければならない。球面ミラーで構成した非対称型ファブリペロー共振器での周回距離の変化の様子を図 6 に示す。共振器長を変化させて収束性を改善した場合でも周回距離の変動については殆ど改善がみられない。

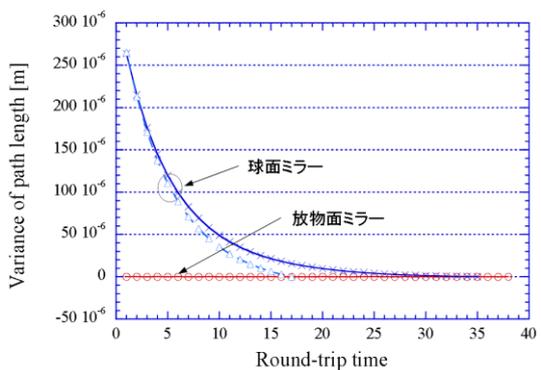


図 6. 非対称型ファブリペロー共振器の周回距離の変化

以上のように、従来の球面ミラーを用いた構成の光共振器では、光蓄積装置として十分に

機能する光共振器が実現できないことをレイトリス法による評価により明らかにできた。

周回ごとの周回距離を一定にし、十分な収束を得るために、放物面ミラーの採用について検討した。放物面ミラー(回転放物面)では図7に示すように、準線と焦点との距離が等しい点の集合が放物線であるので、周回ごとの周回距離が完全に一致する。また、球面収差はないので、非常に良い収束性が得られると考えられる。

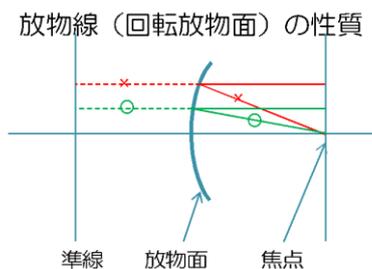
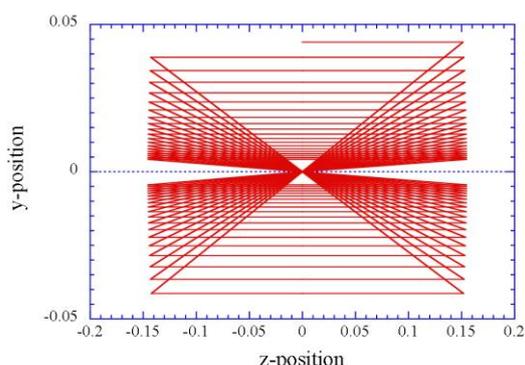
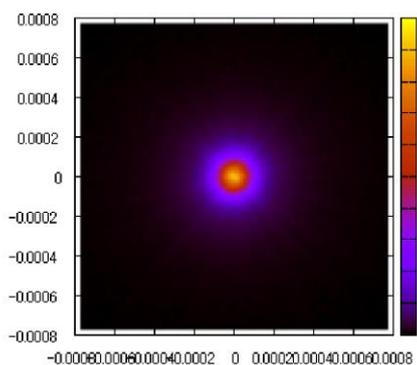


図7. 放物面ミラーで構成した非対称型ファブリペロー共振器の周回距離



共振器内の中心軌道



収束点でのプロファイル

図8. 放物面ミラーで構成した非対称型ファブリペロー共振器の中心軌道と焦点位置でのプロファイル

放物面ミラー非対称ファブリペロー共振器についてもレイトリス法による評価を行った。図6に示すように周回ごとの周回距離に変化はなく常に一定であった。光共振器中の中心軌道と焦点位置でのプロファイルを図8に示す。図からも分かるように、焦点

位置で非常によく収束されていることが分かる。以上のように、本課題の目的を達成するためには、放物面鏡によるファブリペロー共振器の実現が必須である。そこで、当初の計画を変更して放物面鏡によるファブリペロー共振器の実現に重点をおいて研究を進めることとした。

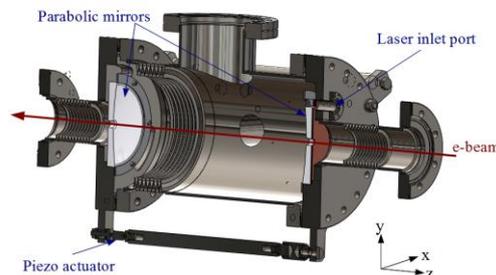


図9. 光共振器試作機

提案した光共振器でのレーザー光の蓄積実験および次世代光源のために開発した電子銃からの電子ビームを利用したコンプトン散乱実験のために図9に示す真空容器と一体となった光共振器を試作した。このミラーは基板にBK7を用い830nm全反射の誘電体多層膜をコートしたものであり、ミラーの形状は軸対称回転放物面である。ミラーの形状はフィゾー干渉計を用いて計測した。計測の結果得られた放物面からのずれ(加工誤差)を図10に示す。×は計測データであり、実線は6次の偶関数で近似した結果である。ここで得られた誤差関数を用いてレイトリス法により蓄積される光のシミュレーションを行った。

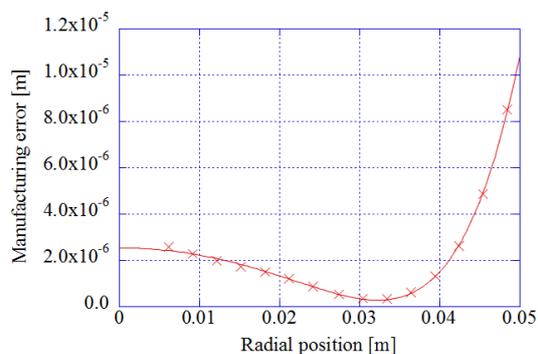


図10. 放物面ミラーの加工誤差

その結果、試作した放物面鏡では集光点でのプロファイルが図11左に示すように、加工誤差による収差のために縦(y方向)に長く伸びてしまうことが分かった。試作した放物面鏡の加工誤差は約 $2\mu\text{m}$ (rms)であった。そこで、その誤差関数をスケールして加工誤差がレーザー波長の1/1000までの場合についてレイトリスを行った。加工誤差が波長の1/30(約 $0.03\mu\text{m}$ (rms))まで小さくなると図11右に示すように、きれいなプロファイルでの集光が得られた。また、加工誤差に対する集光プロファイルのrmsサイズの変化の様子を図12に示す。加工誤差が波長

の 1/30 以下で集光プロファイルの rms サイズが十分に小さくなっていることが分かる。

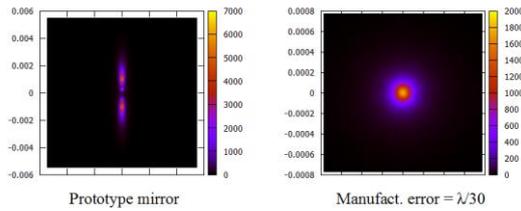


図 1 1. 焦点位置でのプロファイルに与える加工誤差の影響

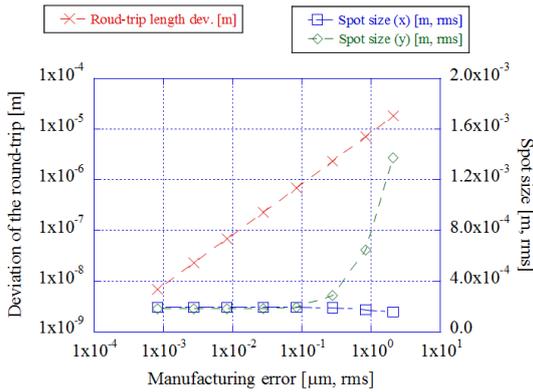


図 1 2. 集光サイズと集荷距離に与える加工誤差の影響

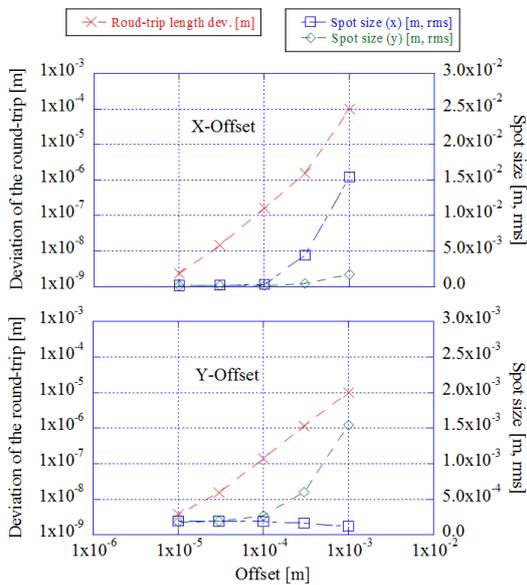


図 1 3. 集光サイズと集荷距離に与えるオフセット (x、y 方向) の影響

さらに、この光共振器では集光部分でレーザー光の位相面が一致することが求められるので、周回距離に対する加工誤差の影響についても調べた。その結果についても図 1 2 に示す。周回距離への影響は非常に大きく、加工誤差が波長の 1/30 であっても、周回誤差が $0.24 \mu\text{m}$ (rms) 程度ある。周回誤差は蓄積されるレーザー光の波長(ここでは 830 nm)の 1/100 程度以下でないと十分な位相整合

が得られないので、加工誤差は波長の 1/1000 まで小さくすることが必要であり、このためには非常に高い加工技術が求められる。光共振器の性能に及ぼすミラー形状の影響の評価と同様の手法により、ミラーのミスアライメントの影響についても評価した。ただし、ミラーの形状は理想的なものであるとした。図 1 3、1 4、1 5 は、それぞれ、断面方向へのオフセット、ビーム軸方法へのオフセット、ミラーの傾きの影響についての評価結果である。

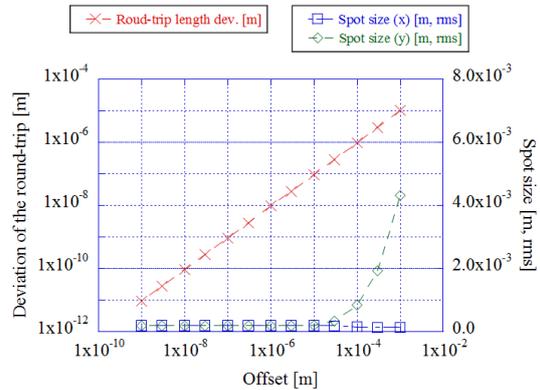


図 1 4. 集光サイズと集荷距離に与えるオフセットの影響 (z 方向)

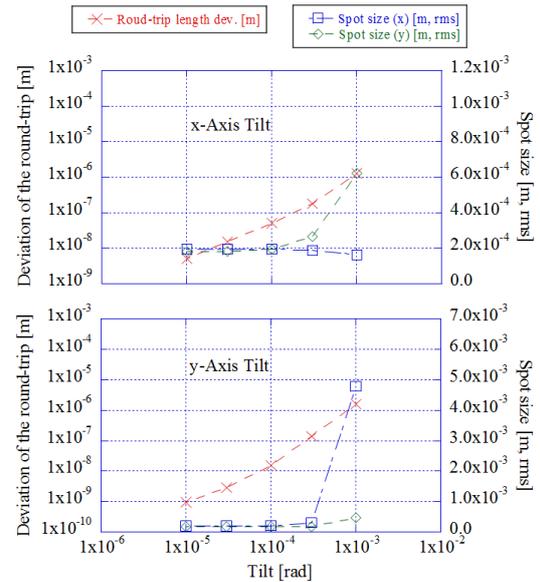


図 1 5. 集光サイズと集荷距離に与える傾きの影響

この図 1 3 から集光サイズは $30 \mu\text{m}$ 程度のオフセットで十分に小さくなり、周回長の誤差も $10 \mu\text{m}$ 程度のオフセットで十分に小さくなる事が分かる。また、z 方向へのオフセットについては、図 1 4 に示すように、z 方向のオフセットが大きくなると集光サイズが y 方向に広がる。これは、y 方向にオフセットした位置で入射する構成であるためである。集光サイズについては $10 \mu\text{m}$ 程度のオフセットでもほとんど大きくなる。一方、周回長については、位相整合をとるには nm 程度以下で z 方向を合わせる必要

があり、従来の光共振器では z 方向のオフセットを変えても波長ごとに位相整合がとれる点が現れる。しかしながら、この共振器ではその範囲が $\pm 1\mu\text{m}$ 程度に限られることが図 1 4 から分かる。

x、y 軸周りの傾きの影響はオフセット時とほぼ同様であり、図 1 5 から集光サイズは $100\mu\text{rad}$ 程度の傾きで十分に小さくなり、周回長の誤差も $10\mu\text{rad}$ 程度の傾きで十分に小さくなるのが分かる。

以上のように、本研究で開発したレイトレイス法による評価は非対称型ファブリペロー共振器の開発において非常に有用な手段であり、今後の同様の研究開発においても再利用可能な評価手段が確立できたとと言える。

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 2 件)

- ① 永井良治、羽島良一、「LCS ガンマ線源単色化のための非対称ファブリペロー光共振器のレイトレイス法による評価」、第 10 回加速器学会年会論文集、近日出版予定、査読無
- ② 永井良治、羽島良一、「LCS ガンマ線単色化のための非対称光共振器の提案」、第 9 回加速器学会年会論文集、pp. 980-982 (2013)、査読無、
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/THPS/THPS041.pdf

[学会発表] (計 4 件)

- ① 永井良治、羽島良一、「単色ガンマ線 LCS のための非対称型ファブリペロー共振器用放物面鏡における面精度の影響」、2013 年 9 月、八戸市
- ② 永井良治、羽島良一、「単色ガンマ線 LCS のための非対称型ファブリペロー共振器用放物面鏡の評価」、原子力学会 2013 春の年会、2013 年 3 月、東大阪市
- ③ 永井良治、羽島良一、「単色 LCS 用光共振器の評価」、原子力学会 2012 秋の大会、2012 年 9 月、東広島市
- ④ 永井良治、羽島良一、「単色ガンマ線 LCS 用光共振器とその応用」、第 9 回高輝度・高周波電子銃研究会、2012 年 3 月、つくば市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永井良治 (NAGAI Ryoji)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・量子ビーム応用研究センター・研究主幹

研究者番号：40354906

(3) 連携研究者

羽島良一 (HAJIMA Ryoichi)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・量子ビーム応用研究センター・グループリーダー

研究者番号：30218432

西森信行 (NISHIMORI Nobuyuki)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・量子ビーム応用研究センター・研究副主幹

研究者番号：60354908