

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：87202

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400305

研究課題名(和文) 光源用電子蓄積リングの高性能化へ向けたスピン偏極効果の探索

研究課題名(英文) Search for spin polarization of a relativistic electron beam for improving the beam lifetime in storage ring

研究代表者

金安 達夫 (Kaneyasu, Tatsuo)

公益財団法人佐賀県地域産業支援センター九州シンクロトロン光研究センター・加速器グループ・副主任研究員

研究者番号：90413997

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：放射光施設SAGA Light Sourceの1.4 GeV電子蓄積リングにおける電子ビームの寿命変動機構の解明と安定化を最終目標として、電子ビームの放射偏極の検証とスピン偏極度測定装置の開発を行った。放射偏極の検証実験ではスピン消極共鳴による電子損失率の増加を観測することに成功した。スピン偏極度の評価のために円偏光レーザーによる逆コンプトン散乱ガンマ線の空間分布測定システムを開発しスピン偏極度測定へ利用する準備を進めた。本研究によってスピン偏極の観点から電子ビームの寿命変動を探索する準備を整えることができた。

研究成果の概要(英文)：We have studied the radiative spin polarization of the 1.4 GeV electron beam and its effect to the beam lifetime in the SAGA Light Source storage ring. As a first step of the experimental investigation, we verified resonant spin depolarization of the stored beam. Sudden changes of the beam lifetime and beam loss rates due to the depolarization were observed. Furthermore we have developed a Compton-scattering polarimeter for studying the variation of beam lifetime due to the spin polarization of the electron beam.

研究分野：電子加速器，原子分子物理

キーワード：電子蓄積リング 放射偏極 ビーム寿命 レーザーコンプトン散乱

1. 研究開始当初の背景

シンクロトロン放射の利用を目的とした電子蓄積リングにおいて、ビーム寿命は重要な性能指標の一つである。一般に蓄積リングのビーム寿命を決める要因は、蓄積リングを周回する電子と残留ガス分子との衝突あるいはタウショック効果(バンチ内の電子・電子散乱)である。タウショック効果は比較的低エネルギーの蓄積リングで支配的となるが、近年の高輝度光発生を目的とした低エミッタ蓄積リングではバンチ内の電子密度が高いため、数 GeV クラスのビームエネルギーでもタウショック効果がビーム寿命を支配する。そのためビーム寿命の制限要因の理解と改善を目的として、タウショック効果に関する研究が多く行われてきた。

我々は放射光施設 SAGA Light Source (SAGA-LS) の 1.4 GeV 電子蓄積リングにおいてビーム寿命の制限要因の解明を目的とした実験研究を進めてきた。これまでに SAGA-LS リングではタウショック効果がビーム寿命を支配することを明らかにしており、SAGA-LS リングの運転状態は加速器の設計指針と一致しているとわかった。しかしながら蓄積リングの運転パラメータがほぼ同一であっても日々の運転におけるビーム寿命には 10% 程度のバラつきがある。これは運転条件の微小な変動がタウショック寿命へ影響を及ぼすためと考えられる。

タウショック寿命の変動要因として電子ビームの自発的なスピン偏極の寄与を推定した。蓄積リングを周回する電子ビームはシンクロトロン放射を通じて徐々にスピンの向きがそろってくる。また電子・電子の散乱確率はスピンの向きに依存するため、スピン偏極した電子ビームは無偏極状態に比べてタウショック寿命が増加する。スピン偏極度が平衡状態へ達する時間は SAGA-LS リングの 1.4 GeV 電子ビームでは 40 分程度である。SAGA-LS リングでは偏極度が飽和するまでの時間が充分短くかつタウショック寿命が支配的である。したがって日々の運転におけるビーム寿命のバラつきは電子ビームのスピン偏極度を反映している可能性がある。

2. 研究の目的

本研究の最終的な目標は SAGA-LS リングのビーム寿命の変動要因を明らかにし、その要因を抑制することでビーム寿命を出来る限り拡大した状態で安定化させることである。そのためにレーザーコンプトン散乱を利用したスピン偏極度測定システムを開発し、ビーム寿命の変動がスピン偏極に起因するのか検証する。

3. 研究の方法

SAGA-LS リングにおいて高エネルギー電子ビームとレーザー光のコンプトン散乱(LCS)を利用したスピン偏極度測定システム(ポラリメータ)を構築する。1.4 GeV 電子ビーム

と赤外レーザー光の LCS では、散乱光子はエネルギーを増大させて MeV 領域のガンマ線となり、電子ビームの進行方向へ集中して放出される。また円偏光レーザーを用いた場合、ガンマ線光子の垂直方向の空間分布にスピン偏極度に応じた異方性が生じるため、左右円偏光に対するガンマ線空間分布の差分を測定すれば電子ビームのスピン偏極度を評価できることが知られている。

SAGA-LS リングでは波長 10.6 μm の CO₂ レーザーを用いた LCS ガンマ線の生成が可能である。本研究では既存のレーザー設備を活用してポラリメータの構築を進めた。またポラリメータの開発に先立ち、電子ビームがスピン偏極状態であることを検証するため、振動磁場によるスピン消極共鳴の観測を行った。

4. 研究成果

(1) スピン消極共鳴の観測

SAGA-LS リングにおけるスピン偏極効果の探索の第一歩として、振動磁場によるスピン消極共鳴の観測を試みた。電子スピンの歳差運動に同調した振動磁場を用いればスピン消極共鳴によるスピン偏極度の低下が起こる。スピン消極共鳴周波数は

$$f_{\text{RSD}} = (n + v_{\text{spin}}) f_{\text{rev}}$$

と表される。ここで f_{rev} は周回周波数、 v_{spin} はスピンチューン、 n は任意の整数である。スピン消極共鳴による偏極度の低下によってタウショック効果が強調されるため、電子損失率の増加としてスピン消極共鳴を検出できる。なおスピンチューンはビームエネルギーに比例するため、消極共鳴周波数の測定はビームエネルギーの高精度決定法としても有用である。

図 1 にスピン消極共鳴の測定例を示す。蓄積リングの各所に設置したビームロスモニター(BLM)による損失電子の計数率をビームパラメータ(サイズ、寿命、電流値)とともに示した。共鳴周波数に対応するビームエネルギーはグラフ最上段の横軸に示してある。磁場周波数 12.787 MHz でビーム寿命の減少と BLM-17 における計数率の増加が観測された。このとき電子ビームのサイズに変化はなく、また蓄積リング真空度の悪化も見られなかったことから、ビーム寿命の急激な変化は消極共鳴によるスピン偏極度の低下と考えられる。消極共鳴周波数に対応するビームエネルギーは 1420.5 MeV となる。これはビームエネルギーの設定値(1400 MeV)に比べると 20 MeV 程度高い値であるが、レーザーコンプトン散乱ガンマ線の最大エネルギーから換算した値(1417 \pm 4 MeV)とは整合しており、その後の追試において再現性も確認された。以上の結果から SAGA-LS リングを周回する電子ビームはスピン偏極しており、水平振動磁場の周波数掃引による消極共鳴を検出できたと結論した。本研究成果によって SAGA-LS リングを周回する電子ビームのスピン偏極を

確認できたことに加えて、電子ビームのエネルギー測定法としての消極共鳴の有用性も確認された。

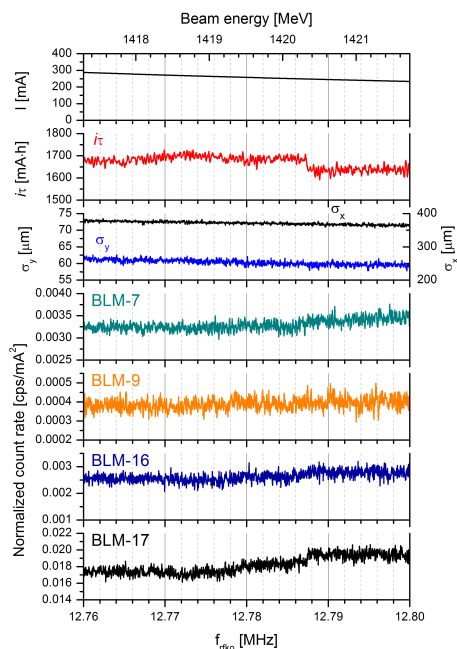


図 1: 振動磁場の周波数掃引によるスピン消極共鳴の観測。

(2) ポーラリメータ開発

LCS を利用したスピン偏極度測定システム(ポーラリメータ)の開発研究を行った。開発当初は円偏光レーザーによる LCS ガンマ線の発生試験とコリメータスキャンシステムの構築を進めた。左右円偏光のレーザー光を利用するため、既設の LCS 実験装置の光学系へ波長板を組み入れた。LCS ガンマ線の空間分布を測定するために、直径 1~3 mm の鉛コリメータと XY ステージを組み合わせたシンプルなスキャンシステムを製作した。図 2 に BGO 検出器で測定した円偏光 LCS ガンマ線のエネルギースペクトルを示す。最大エネルギー 3.5 MeV のガンマ線が生成されていること、またコリメータ使用時にはエネルギー幅の狭いスペクトルが得られていることからコリメータで LCS ガンマ線の中心軸付近を切り出せることが確認された。図 3 にコリメータスキャンによる円偏光 LCS ガンマ線の空間分布の測定例とシミュレーションを示す。ガンマ線の空間分布は比較的等方的である。これは円偏光レーザーによるコンプトン散乱の角度分布を反映した結果と考えられ、ガンマ線の空間分布のレーザー偏光依存はシミュレーションによる予測とも概ね整合した。

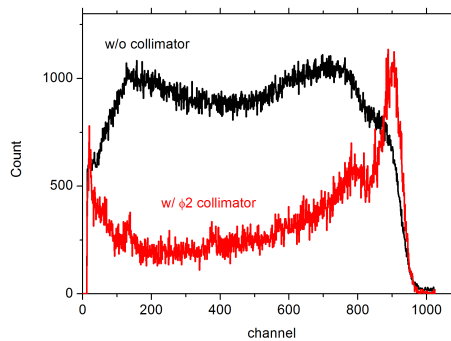


図 2: 円偏光レーザーを用いた LCS ガンマ線の生成試験。ガンマ線のエネルギースペクトルは BGO 検出器で測定した。ガンマ線の最大エネルギーは 3.5 MeV。

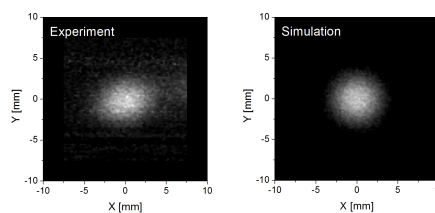


図 3: コリメータスキャンによる LCS ガンマ線の空間分布測定とシミュレーションとの比較。コリメータ径は $\phi 2$ mm。

スピン偏極に起因する LCS ガンマ線の空間分布の異方性は垂直方向の強度分布に生じることが知られている。開発したコリメータスキャンシステムを用いて、電子ビームのスピン偏極に関する情報を得るために、左右円偏光のレーザー光に対する LCS ガンマ線の空間分布測定を行った。実験開始当初は散乱ガンマ線の抑制、コリメータ軸の位置・回転調整機構の増強、レーザー出力の安定化など、測定システムに多くの問題点が見いだされ、装置開発と調整方法の確立に多くの時間を費やした。最終年度までにコリメータスキャンシステムの調整に目途をつけ、SAGA-LS リングを周回する 1.4 GeV の電子ビームに対して LCS ガンマ線の差分測定を進めた。差分測定の例を図 4 に示す。この測定では 1.4 GeV への加速終了から電子ビームは数時間蓄積されており、電子ビームは確実にスピン偏極していると考えられるが、差分信号の非対称性は検出できていない。ガンマ線空間分布測定の手法を確立した後、スピン偏極度の大きな変化が予想される 1.4 GeV への加速終了直後と数時間の蓄積後の電子ビームについて、最適な測定条件を探りながら差分測定を繰り返したが、いずれの測定条件においても電子ビームのスピン偏極の兆候を見出すことができなかった。

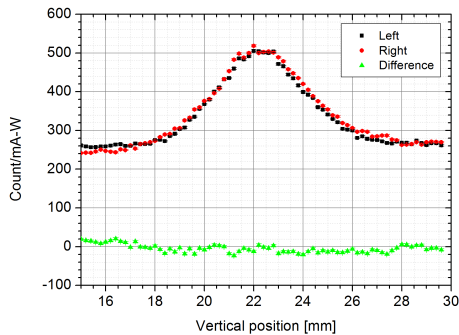


図 4: コリメータスキャンで測定した左右円偏光 LCS ガンマ線の空間分布と差分。

研究期間中に LCS ガンマ線の空間分布を測定する手法を確立することはできなかった。電子ビームのスピンの偏極評価には至らなかった。測定上の問題は主にレーザーの出力変動に起因すると考えている。LCS ガンマ線の空間分布に基づいて電子ビームのスピンの偏極度を評価するには、レーザーの出力安定化や散乱ガンマ線の除去に関するさらなる改善が必要である。今後はスピン偏極以外の要因まで含めてビーム寿命の変動に対する要因調査を継続し、SAGA-LS リングにおける蓄積ビームの長寿命化へ向けた方策を探る予定である。

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 1 件)

T. Kaneyasu, Y. Takabayashi, Y. Iwasaki, S. Koda, Observation of Resonant Spin Depolarization in SAGA-LS Storage Ring, Proceeding of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 査読無, 2014, 982-985.

〔学会発表〕(計 2 件)

金安達夫, 高林雄一, 岩崎能尊, 江田茂, SAGA-LS 蓄積リングにおけるスピン消極共鳴の観測, 第 11 回日本加速器学会年会, 2014 年 8 月 10 日, リンクステーション青森(青森県)

金安達夫, 高林雄一, 岩崎能尊, 江田茂, SAGA-LS リングにおけるスピン消極共鳴の観測, 第 10 回九州シンクロトロン光研究センター研究成果報告会 2016 年 8 月 3 日, サンメッセ鳥栖(佐賀県)

6. 研究組織

(1)研究代表者

金安 達夫 (KANEYASU TATSUO)

九州シンクロトロン光研究センター・加速器グループ・副主任研究員

研究者番号: 90413997