

NewSUBARUにおける高エネルギーガンマビームを利用した ガンマ線誘起陽電子消滅測定装置の開発

DEVELOPMENT OF HIGH ENERGETIC GAMMA BEAM INDUCED POSITRON ANNIHILATION APPARATUS AT NEWSUBARU

杉田健人^{#, A)}, 宮本修治^{B)}, 寺澤倫孝^{B)}, 橋本智^{B)}, 天野壮^{B)}, 梅澤憲司^{A)}, 堀史説^{A)}
Kento Sugita^{#, A)}, Shuji Miyamoto^{B)}, Mititaka Terasawa^{B)}, Satoshi Hashimoto^{B)}, Sho Amano^{B)},
Kenji Umezawa^{A)}, Fuminobu Hori^{A)}
^{A)}Osaka Prefecture University

^{B)}Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo

Abstract

We have developed a high energetic positron annihilation spectroscopy (PAS) apparatus using by Laser Compton Scattering (LCS) gamma beam at NewSUBARU synchrotron radiation facility, LASTI, University of Hyogo. The purpose of the apparatus is to measure for the bulk materials. We have tried two positron annihilation methods. One PAS was using a high energetic positron beam generated pair creation from 10 MeV over gamma beam irradiation to Pb target, the other hand was gamma beam directly implantation of the measurement samples. Any measurement used size of the sample mm or cm order at atmosphere.

1. はじめに

陽電子は電子の反粒子で、電子と同じ質量と逆符号の正電荷をもつ。この様な陽電子は物質中に侵入すると、原子核と電気的に反発を起こし空孔を自己探索する性質がある。陽電子は電子と対消滅を起こし消滅ガンマ線を放出するが、消滅ガンマ線のエネルギーは電子の運動量が反映される。また陽電子の物質中への入射から消滅ガンマ線放出までの時間には陽電子消滅サイトの電子密度が反映される。この様な性質を持つことから陽電子はナノスケールのプローブとして金属、半導体や高分子材料などあらゆる物質の材料研究に用いられてきた。陽電子の取得には放射性同位元素 (RI: radioisotope) の β^+ 崩壊、または 1.022 MeV 以上のエネルギーを持つ光子による電子・陽電子対生成の 2 通りの方法により入手される。実験室レベルでは RI から作る非密封線源を用いる方法がある。非密封線源はカプトンや Ni 等の薄膜で RI を挟んだものとなる。実験ではこの線源を試料で挟んで陽電子消滅測定を行う。この様な測定では同一情報を持つ試料を 2 つ用意する必要がある。また測定データには RI を保持している薄膜中での陽電子消滅成分が上乗せされる。加えて RI から放出される陽電子のエネルギーは白色で、測定の侵入深さは異なる。この様な問題を解決するために加速器を用いた陽電子のビーム化が行われている。陽電子ビームは RI や対生成から取得した陽電子を電場による加速を用いたエネルギーの単色化や磁場による軌道制御を行い、陽電子ビームを試料の特定の領域に直接入射させ 3 次元的なデータが得られる。また、ビーム化によって単一試料で測定可能になり、デー

タに線源成分が混ざることが無くなる。この様な陽電子ビームは特にエネルギー 100 keV 以下に加速した低速陽電子ビームとして多くの施設で稼働している[1, 2]。陽電子の侵入深さはエネルギーに依存しているため、低速陽電子ビームは表面から約 100 μm までの表面を観察領域としている。また、低速陽電子の散乱を防ぐために、測定環境を真空にする必要がある。この様な問題からバルク材に対する大気中その場測定は困難であった。

そこで、我々は Laser Compton Scattering (LCS) によって生成した 10 MeV を超えるガンマビームにより、MeV オーダーの高速陽電子を生成し、これによってバルク材料の評価を行う装置 (FPAS: Fast Positron Annihilation Spectroscopy) を開発している[3-5]。FPAS では使用するレーザーの切り替えや磁場を調節することで様々なエネルギーの陽電子が使用可能で、試料の深さ分布に関する情報が得られる。

また、ガンマ線を試料に直接入射させバルク材を直接評価する Gamma induced Positron Spectroscopy (GiPS) という手法が近年開発されている[6, 7]。しかし、従来の GiPS はガンマ線エネルギーが低い、もしくは制動放射を利用しているためエネルギー分布が広く、陽電子の生成効率が低くなる。我々の使用する NewSUBARU-BL01 の LCS ガンマ線は 10 MeV 以上の高エネルギーで単色性が高く、効率よく陽電子が生成できる。本稿では NewSUBARU 放射光施設 BL01 の LCS ガンマ線を利用した FPAS と GiPS の現状について報告する。

[#]dc106002@edu.osakafu-u.ac.jp

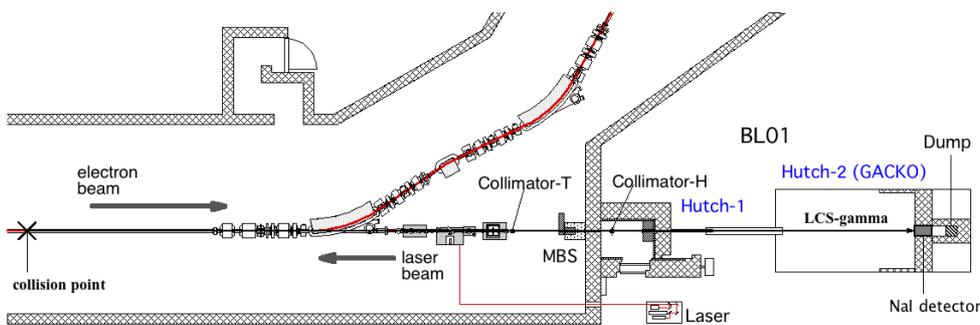


Figure 1: LCS gamma ray system at NewSUBARU BL01.

2. NewSUBARU 放射光施設の LCS と高速陽電子の生成

NewSUBARU は SPring-8 サイト内にある中型放射光子施設で軟 X 線～赤外領域の放射光と LCS ガンマ線ビームラインがある。Figure 1 に LCS のビームラインである NewSUBARU-BL01 の概観を示す。LCS は相対論的電子とレーザー光子の間に起こる散乱で、通常のコンプトン散乱とは逆で光子にエネルギーが付与される。NewSUBARU では BL01 の光学台に 4 台のレーザーを設置してあり、ここからレーザー光を入射し蓄積リング内を周回する電子と LCS を起こす。このとき LCS ガンマ線は 2 つの鉛コリメータを通過し、ハッチ 2 (GACKO) で実験に使用する。一般的に LCS ガンマ線のエネルギーは電子の運動エネルギーとレーザー波長により決まる。NewSUBARU 通常運転 1 GeV (校正值 982 MeV) の場合で各レーザーを使用したときの LCS ガンマ線のエネルギーとフラックスを Table 1 に示す。また、このときの LCS ガンマ線により生成される陽電子を PHITS[8]によりシミュレーションしたものを Fig. 2 に示す。このシミュレーションは光子を厚さ 3 mm の鉛に入射し、ここから取り出される陽電子のエネルギー分布を求めている。シミュレーション結果からもわかるように生成陽電子のエネルギーがもとの光子のエネルギーから電子・陽電子の質量の和である 1.022 MeV を引いた値が最大強度となる。本研究では LCS ガンマ線フラックスと陽電子生成効率を考慮して Nd レーザーを使用する。

Table 1: Condition of LCS Gamma Ray at NewSUBARU

レーザー	LCS ガンマ線		
	波長 [nm]	エネルギー [MeV]	フラックス [photon/s]
Nd2ω	532	33.3	1.5E+6
Nd	1064	16.9	8.5E+6
Er	1540	11.8	6.1E+5
CO ₂	10592	1.73	1.3E+6

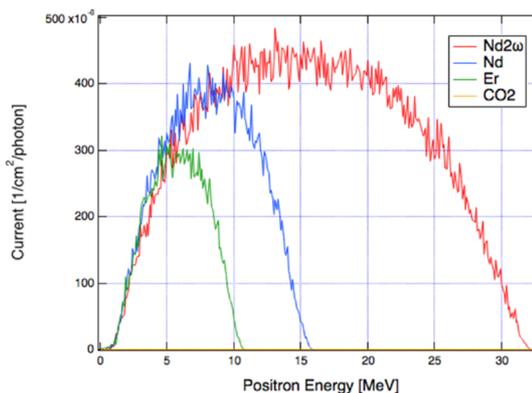


Figure 2: Simulation of the energy of pair production positron from 16.9 MeV gamma photon into thickness of 3 mm Pb plate.

3. FPAS

Figure 3 に高速陽電子装置を示す。この装置は対生成ターゲット、電磁石、試料ホルダーと検出器の遮蔽が一体になっている。装置のサイズは 1 メートル四方程度で実験ハッチ 2 に配置して使用する。対生成ターゲットに厚さ 3 mm の鉛板を使用している。本実験では 16.9 MeV の LCS ガンマ線を鉛に入射させ対生成を起こし、8 MeV の高速陽電子が試料に注入されるように磁場を調節した。このとき試料から放出される消滅ガンマ線のエネルギーを HP-Ge 検出器で測定するドップラー拡がり測定を行った。試料には純鉄 (厚さ 7 mm) とシリコン (厚さ 17 mm) を使用した。8 MeV の陽電子では鉄への注入深さが最大で 6 mm となる[5]。これらの測定結果を Fig. 4 に示す。このプロファイルは、消滅ガンマ線スペクトルからバックグラウンドを差し引き、ガウスフィッティングを行ったものを面積で規格化してある。測定試料内部の空隙が大きいほど、陽電子が運動量の低い電子と対消滅を起こす確率が高くなり、ドップラープロファイルが先鋭化する。本測定においても、密度の低いシリコンのスペクトルが鉄のものよりも先鋭化する妥当な結果が得られた。この測定の消滅ガンマ線係数率は 3~10 [count/s]であった。

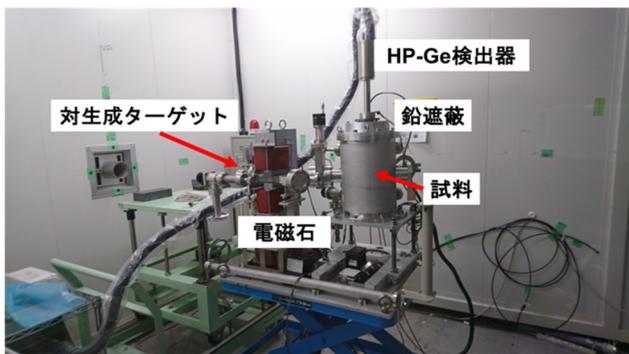


Figure 3: FPAS apparatus.

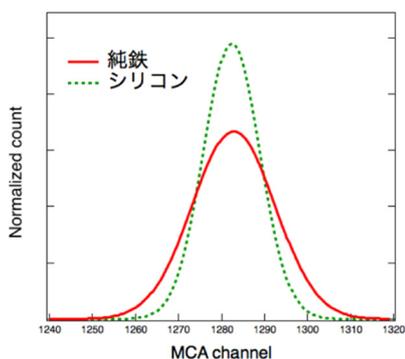


Figure 4: Doppler profiles by FPAS in pure iron and silicon.

4. GiPS

GiPS は使用するガンマ線のエネルギーが高いほど、ガンマ線の透過能が高くなるため、大きな試料が測定できる。Figure 5 に PHITS シミュレーションによる厚さ 5 cm の鉄に 17 MeV のガンマ線が入射した場合のガンマ線と陽電子の飛跡を示す。このシミュレーションのガンマ線進行方向は左から右へ向かう。シミュレーションから陽電子はガンマ線の通過領域を中心に生成・消滅することがわかる。これが GiPS による試料観察領域となる。Figure 6 に GiPS のセットアップを示す。GiPS は試料、鉛遮蔽と HP-Ge 検出器という簡便な構成になっている。Figure 7 に 16.9 MeV の LCS ガンマ線を用いた GiPS による鉄（厚さ 5 mm）とシリコン（厚さ 17 mm）のドップラー拡がり測定結果を示す。この測定では FPAS と同様の傾向を持つドップラースペクトルが得られた。また、GiPS の消滅ガンマ線計数率は 100~180 [count/s]であった。

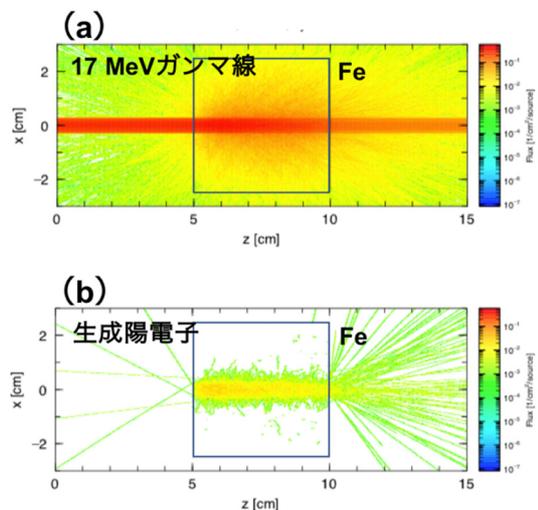


Figure 5: Simulation of GiPS (a) 17 MeV gamma photon track (b) positron track.

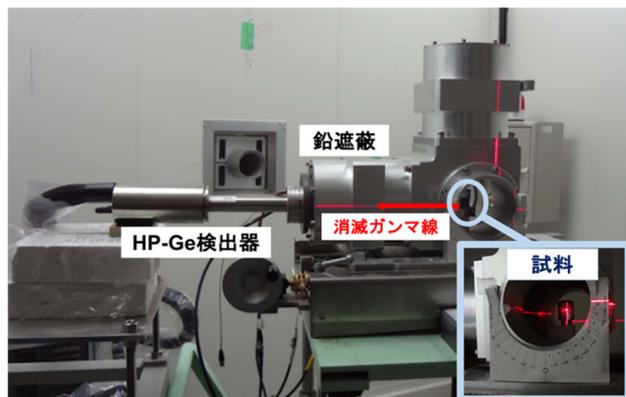


Figure 6: GiPS apparatus.

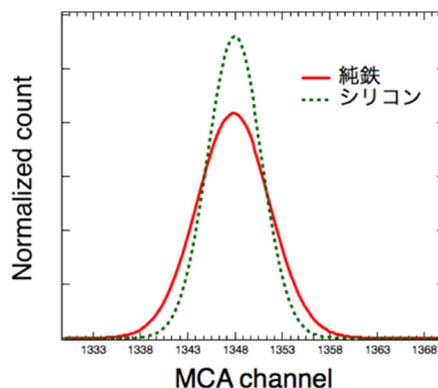


Figure 7: Doppler profiles by GiPS in pure iron and silicon.

5. まとめ

従来の陽電子消滅法では測定が難しい mm~cm サイズのバルク試料に対する 8 MeV の陽電子を用いた FPAS を行った。同様のサイズの試料に対して 16.9 MeV の LCS ガンマ線による GiPS を行った。これらの測定において同様の傾向を持つ結果が得られた。FPAS と GiPS は観察領域が異なるが、今回使用した試料は全体的に均質なものであるため、妥当な結果である。GiPS の性質から、測定試料のサイズと対生成散乱断面積が大きくなると、係数効率は高くなる。我々の GiPS は高エネルギーであることから、インゴットの様なバルク材に対して非破壊測定が可能である。現在はこの二種類の陽電子消滅測定に、陽電子寿命測定を含めたシステムの高度化と合金など実用材を標的とした測定を行っている。

謝辞

本研究は NewSUBARU 放射光施設の運転員・スタッフの皆様の協力により行われました。またガンマ線実験ハッチ GACKO を甲南大学よりお借りしました。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- [1] P. Sperr *et al.*, Applied Surface Science, 255, (2008), 35-38.
- [2] Q. Xu *et al.*, Jour. of Phys. Conf. Series, 505, (2014), 012030.
- [3] F. Hori *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. Conf. Proc.2 011301 (2014).
- [4] F. Hori *et al.*, Jour. of Phys. Conf. Series, 674, (2016), 012025.
- [5] 堀史説 他、陽電子科学第 10 号 (2018) pp. 21-28.
- [6] Y. Taira *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 84, 053305, (2013).
- [7] M. Butterling *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Research B 269, (2011), 2623-2629.
- [8] Tatsuhiko Sato, Yosuke Iwamoto, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Ogawa, Takuya Furuta, Shin-ichiro Abe, Takeshi Kai, Pi-En Tsai, Norihiro Matsuda, Hiroshi Iwase, Nobuhiro Shigyo, Lembit Sihver and Koji Niita Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version3.02, J. Nucl. Sci. Technol., 2018;
<https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1419890>