

東北大学 ELPH の光子標識化装置の開発

○梅津裕生^{#,A)}

A)東北大学大学院理学研究科

概要

東北大学電子光物理学研究センター(ELPH)シンクロトロン加速器の偏向電磁石内に設置した光子標識化装置(以下 **Tagger** と記す)の開発過程を報告する。本装置は、原子核物理実験で使用する制動放射 γ 線のエネルギーと発生タイミングを測定するため、 γ 線を放出した反跳電子の軌道の上に、プラスチックシンチレータと半導体光センサーで構成した検出器 135 台を配置したものである。電磁石中に設置するため、コンパクトに設計し、筐体は非磁性材料で構成した。また、この筐体は設計上の工夫により 3 分割とし、容易に電磁石内外へ挿入と退避ができる可動式とした。実験時以外は電磁石外で待機することで放射線暴露による半導体センサーの損傷が軽減し、装置の長寿命化に貢献した。

1 はじめに

エネルギー E_e の電子を標的物質に照射すると、物質を構成する原子核の電場により電子は減速され、入射方向にさまざまなエネルギーの制動放射 γ 線を発生する。エネルギー保存則により、 γ 線を放射した反跳電子の運動エネルギー $E_{e'}$ がわかると、既知の入射エネルギー E_e との差から放射された γ 線のエネルギー E_γ を知ることができる。すなわち、

$$E_\gamma = E_e - E_{e'}$$

と表される。この γ 線光子を物理実験に使用する際、個々の γ 線のエネルギーを知る必要があるが、直接測定すると γ 線は消滅してしまう。しかし、個々の反跳電子のエネルギーを知ることで、 γ 線のエネルギーを非破壊で測定できる。また、反跳電子を検出した時刻から γ 線の発生タイミングを知ることができる。

標的を電子軌道に挿入すると、制動放射を起こした電子は元の電子軌道とほぼ同じ方向に飛んでいき、反跳電子は光子を生成した分だけエネルギーを失う。加速器内の電磁石による磁場中を通過するとき、そのエネルギーに応じて反跳電子の曲がる軌道が異なるため、多数の検出器をそれぞれ異なるエネルギーの反跳電子軌道の位置に配置することで反跳電子のエネルギー $E_{e'}$ の決定が可能となる。

以上のようにして制動放射 γ 線のエネルギーと発生タイミングを知る手法を光子標識化といい、この測定を行うのが光子標識化装置(**Tagger**)である。

図 1 に示すように、ELPH で行われる原子核物理実験“NKS2 実験”で用いられる制動放射 γ 線は、蓄積型電子シンクロトロン(BST リング)を周回する運動エネルギー1.3 GeVの電子ビームに、 $\phi 11 \mu\text{m}$ のカーボンワイヤー標的を挿入することで生成される。

反跳電子の各軌道の上に配置する検出器はプラスチックシンチレータと半導体光センサーMPPC(Multi-Pixel Photon Counter)で構成し、反跳電子軌道の上流側に **TagF** と呼ぶエネルギー決定用の検出器を、下流側には **TagB** と呼ぶ発生タイミング測定用の検出器を配置する。**Tagger** はこれら検出器群を **BM4** 偏向電磁

石内の所定の位置に保持する。

BM4 内には旧型の **Tagger**(発表者が以前設計)が設置されていたが、検出器群の配置の見直しが必要になったことや、検出器群の一部が放射線損傷で動作不全となったことなどにより、新たな **Tagger** を設計・製作することにした。

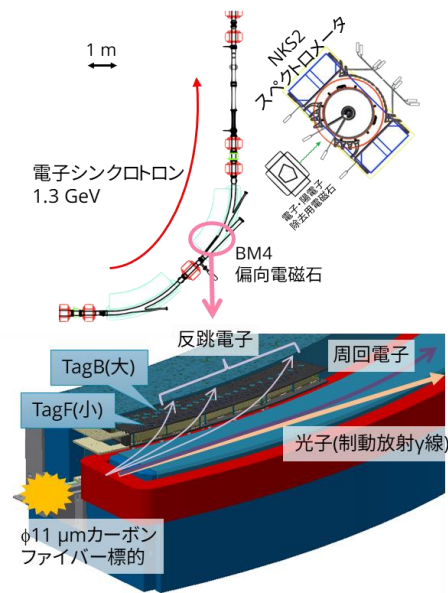


図 1 BST リング(一部のみを示す)内の γ 線発生と反跳電子検出の模式図

2 Tagger について

2.1 要求仕様

Tagger を更新する上での要求仕様は以下の 4 項目であった。

- (1) **BM4** 内の限られたスペース内に設置できるよう、コンパクトに設計する。
- (2) 最大磁場 1.4 T の電磁石内に設置するため、材料は樹脂もしくは非鉄金属を用いる。
- (3) **BM4** 内へスムーズにインストールできるよう本

体を分割する。

(4) 所定の位置に決められた設置方法で検出器群を設置する。

要求仕様(1)、(2)は BM4 内に設置することによるもので、旧 Tagger ですでに達成済みであったため、構成材料の選定や設計の際に旧型を参考にして、この二項目を満足した。

旧 Tagger は BM4 内に恒常的に設置されていたため、加速器運転時の放射線暴露が積算して、上述した検出器の放射線損傷が発生したものと考えられる。新 Tagger は、実験期間以外は BM4 外へ退避して不要な放射線暴露を回避する。よってインストールの頻度が増加するため、要求仕様(3)を満足する必要がある。

要求仕様(4)は、アセンブリ方法が決まっていた検出器を反跳電子の軌道上に設置するために必要である。

2.2 設計概要

設計した Tagger 本体の外観を図2に示す。筐体は、長手方向に3つのユニットに分割した。各ユニットは分割境界内径側の円支柱を介して結合しており、支柱を中心とした円周方向の回転自由度によりユニット間の開き角が調整できる。

TagF と TagB のプラスチックシンチレータは黒い上下のベース板に挟まれた領域に配置し、シンチレーション光検出用の MPPC を搭載した円形基板が上下のベース板に固定されている。搭載数は TagF が105個、TagB が30個である。

ベージュ色に示す底板を BM4 内のレール上に載せ、2本の円弧状レール間ギャップへ底板に取り付けたガイドピン先端をねじ込むことで各ユニットの可動範囲がレールに沿った方向に拘束される。

Tagger を閉じたときの筐体の全長は 1030 mm、幅は 160 mm の円弧状で、底面から最上段の回路基板表面までの高さが 229.6 mm である。

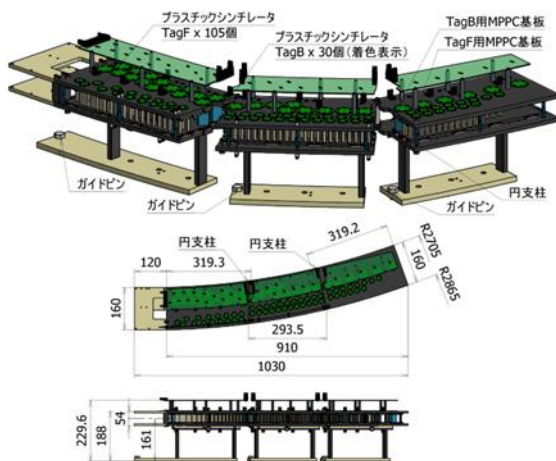


図2 Tagger 本体の外観(単位は mm)

筐体の長手方向を2分割していた旧 Tagger は、一方のユニット長が長すぎて、BM4 に隣接する四重極電磁石 QC2 と干渉するため、Tagger を出し入れする際はハンドル操作で BM4 をヨーク円弧の中心方向へ 200 mm 動かす手間があった。それに対して、新 Tagger は筐体を3分割することで、BM4 を移動しなくても QC2 と干渉せず出し入れできるようになり、要求仕様(3)を満足した。この3分割の実現には、後述する検出器配置の工夫が必要であった。

Tagger はユニット間の開き角を調整しながら BM4 内にインストールしたあと、ワイヤーを引くことにより BM4 の奥へ入ったユニットを出口側に引き付ける。このワイヤーは引っ張った状態で長さを固定できるため、分割3ユニットをすき間なく結合できる。また、分割境界はベース板を凹凸のある形状とし、この凹凸を噛み合わせることで引き付けて結合する際の幅方向の位置合わせをしている。

2.3 検出器群の配置

上下いずれかのベース板に TagF の MPPC 搭載基板を全数設置しようとする干渉してしまうため、TagF は上下に分けて配置した。取り付け数は上ベース板へ TagB 全30個と TagF 全105個のうち53個、下ベース板へ TagF 52個である。この上下ベース板を噛み合わせるように組み立てることで反跳電子の取りこぼしのない TagF 配置が実現できる。

TagF、TagB の配置座標は、当初、反跳電子軌道のシミュレーション結果から図3に示す5案が検討された。しかし、いずれも TagF の配置が密で、分割領域を設けることができなかった。そこで、3分割のユニットそれぞれに異なる案の配置を適用することで、一つの案では連続的である TagF 配置に不連続な領域を作って、分割領域を捻出することができた。以上により、要求仕様(3)と(4)を満足した。

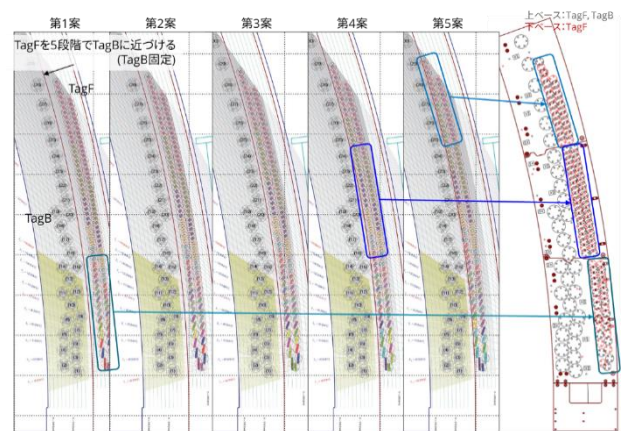


図3 TagF, TagB の5つの当初配置案と、採用した配置の比較

3 まとめ

4項目の要求仕様をすべて満たした新 Tagger の設計・製作を行った。評価実験の検出器群を通過した電子のシグナルの解析から、検出器位置が想定した位置にあり、要求された性能が出ていることが確認された。

参考文献

- [1] 梅津裕生、東北大学大学院理学研究科・理学部 令和3年度技術部報告 Vol.34、pp11-14