

CLYC シンチレータとダイヤモンド検出器の中性子に対する応答関数の整備

Measurements of response functions of the CLYC scintillator and the diamond detector to neutrons

鎌田 創¹⁾

So Kamada

徐 秀清²⁾

Xu Xiuqing

萩原 雅之^{2,3)}

Masayuki Hagiwara

¹⁾海上技術安全研究所 ²⁾総合研究大学院大学 ³⁾高エネルギー加速器研究機構

(概要)

放射線標準施設加速器中性子照射施設において、144 keV, 565 keV, 1.2 MeV, 5.0 MeV, 14.1 MeV の 5 エネルギー点で CYRIC シンチレータと ⁶LiF 熱中性子コンバータ付きダイヤモンド検出器の単色中性子に対する応答関数の測定を行った。

キーワード：単色中性子、ダイヤモンド検出器、CLYC シンチレータ

(1行あける)

1. 目的

本研究では、近年 ³He ガス検出器の代替として開発された CLYC シンチレータの中性子に対する応答関数を整備し、一台で中性子とガンマ線を弁別しながらエネルギースペクトル測定が可能で、軽量で携帯性にたけた中性子検出器を開発することと、高ガンマ線環境下で燃料デブリから放出される核分裂中性子を測定するダイヤモンド中性子センサの応答関数を整備することを目的とする。

2. 方法

2.1 CLYC シンチレータの照射試験

CLYC シンチレータは直径 2.54 cm、長さ 2.54 cm の無機結晶である。直径 2.54 cm の光電子増倍管に結合し、シンチレーション光を電気信号にさせる形式とした。本研究では、中性子エネルギー 144 keV, 565 keV, 1.2 MeV, 5.0 MeV, 14.8 MeV の単色中性子に対して CLYC シンチレータの応答関数を測定した。検出器位置での中性子束は、ターゲット周辺に設置したロングカウンターの計数から放射線標準施設が提供する換算係数を利用して導出した。

検出器からの信号は、ケーブルを介して照射室外に配備した NIM と CAMAC 規格からなる信号処理回路に接続し、PC にデータを取り込んだ。検出器はターゲットから 1.0 m から 4.5 m の距離でビーム軸上に設置した。中性子とガンマ線を弁別するため、検出器の入射粒子に対する信号波形の立ち上がり成分の違いを利用して、一イベント毎に粒子弁別測定を行なった。今回は、ゲート幅を 120 ns として立ち上がり成分を積分した電荷量と、ゲート幅を 1.5 μ 秒として波形全体を積分した電荷量を同時に取り込んだ。

2.2 ダイヤモンド検出器の照射試験

照射試験に用いたダイヤモンド(Cividec: B6-C)検出器は、95%濃縮の ⁶LiF 中性子コンバータ(1.9 μ m 厚)によって、熱中性子を三重水素と α 粒子に変換し、それらの荷電粒子が有感領域 10 mm² の CVD ダイヤモンドに付与するエネルギーを計測する仕様となっている。信号処理回路としては、電荷積分型前置増幅器、主増幅器と高圧電源を実験室に配置し、計数室に配置した MCA に主増幅器からの出力信号を接続し波高分布を計数する。水体系を模擬するため 30 cm×30 cm×15 cm 厚の水ファントムを用いて、ダイヤモンド検出器を線源から 1.1~1.3 m の距離で、水ファントムの前面(Albedo 体系)と水ファントムの間(Sandwich 体系)に配置し、室温においてダイヤモンド検出器の電極面に対して垂直方向から 1~2 時間の照射を行った。

3. 結果及び考察

3.1 CLYC シンチレータの応答

粒子弁別測定で得られた波形弁別 2 次元プロットを、5 MeV 中性子実験の場合の測定を例として図に示す。

図の縦軸は検出器出力波形を立ち上がりから 120 ns 間積分した成分 (Fast Component)、横軸は立ち上がりから 1.5 μ s 間積分した成分 (Total Component) を示す。CLYC シンチレータに中性子が入射する場合、熱中性子は主に CLYC の構成元素である ${}^6\text{Li}$ 原子核と ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ 反応を起こして三重水素や α 粒子のエネルギー付与を介して検出される。一方、高速中性子は主に ${}^{35}\text{Cl}(n, p)$ 反応を起こして陽子のエネルギー付与を介して検出される。これらのイベントは、図 1 の赤点線で囲った領域である。また、ガンマ線はシンチレータに入射して光電効果等による 2 次電子のエネルギー付与を介して検出される。対応するイベントは図 1 中の緑で囲った領域である。この 2 次元プロットから中性子によるイベント、ガンマ線によるイベントをそれぞれ切り出したものが、図 2 の波高分布である。横軸を Total Component、縦軸をチャンネルあたりのカウント数で示してある。CLYC 内で起きた全事象を青い実線、中性子による事象を赤い実線、ガンマ線による事象を緑の実線で示してある。また中性子による事象について、検出器に入射した中性子束で除した波高分布を図 3、図 4 に示す。横軸はシンチレータの発光量に換算しており、MeV electron equivalent 単位で示してある。両者のスペクトルの特徴として、熱中性子と ${}^6\text{Li}$ 原子核との核反応 ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ 反応起因の α 粒子のエネルギー付与によるピークが 3.3 MeVee に存在する [1]。また、高速中性子と ${}^{35}\text{Cl}$ 原子核との核反応 ${}^{35}\text{Cl}(n, p)$ に起因の陽子のエネルギー付与によるピークがそれぞれ 1.6 MeVee (図 3)、5.5 MeVee (図 4) で観測できている。また、高速中性子と ${}^6\text{Li}$ 原子核との核反応 ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ 反応起因の三重陽子 α 粒子のエネルギー付与である分布が 4 MeVee から 5 MeVee に分布 (図 3)、6.5 MeVee から 9.0 MeVee に分布 (図 4) しているのがわかった。この CLYC シンチレータはこのエネルギー領域において中性子事象をピークで観測できるため、今後の中性子サーベイに広く活用できる可能性を見出した。今後さらに、エネルギー点を変えてデータを取得し、CLYC シンチレータ内の中性子の挙動に系統的なパラメータ取得を行なっていく。

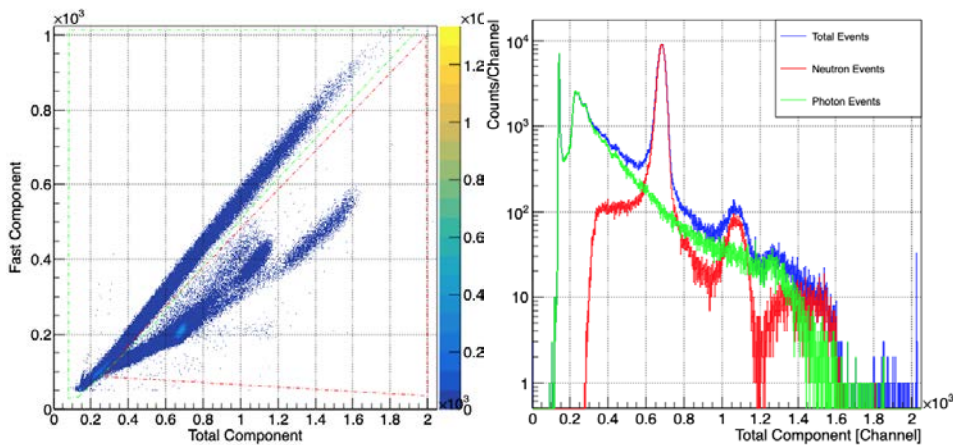


図 1 5 MeV 中性子照射時の CLYC の粒子弁別プロット

図 2 5 MeV 中性子照射時の CLYC 波高分布

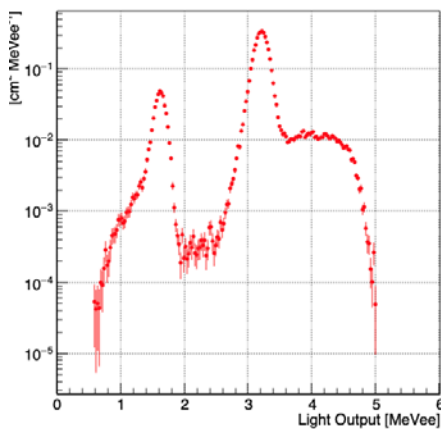


図 3 1.2 MeV 中性子照射時の CLYC 波高分布

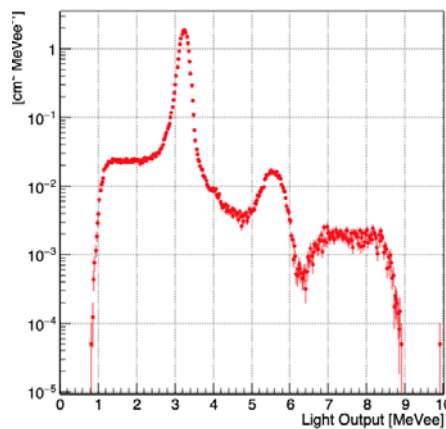


図 4 5.0 MeV 中性子照射時の CLYC 波高分布

3.2 ダイヤモンド検出器の応答

各エネルギー、照射体系毎に 25 μ m 厚と 140 μ m 厚の検出器それぞれで測定された波高分布を図 5 に示す。

左から入射エネルギー144 keV, 565 keV, 1.2 MeV, 5.0 MeV, 14.8 MeV に対応し、上半分が Albedo 体系、下半分が Sandwich 体系である。

1.2 MeV 以下の入射エネルギーについては、以前実施した熱中性子照射の結果と同様な波高分布が得られている。入射エネルギーが 5 MeV 以上になると中性子が水ファントムによって減速して B6-C 検出器に入射する成分の他に直接ダイヤモンドの炭素と弾性散乱し、反跳した炭素がエネルギー付与する成分が波高分布において確認された。また、14.8 MeV においては 9 MeV 付近に $^{12}\text{C}(n, \alpha)^9\text{Be}$ 反応 (しきいエネルギー: -5.7 MeV) のピークが 3 MeV 付近の熱中性子に起因する ^3H ピークの他に確認された。中性子と炭素の直接反応の成分は 140 μm 厚の波高分布に顕著にみられるが、25 μm 厚ではその効果は小さい。自発核分裂反応から発生する中性子のエネルギーは 2 MeV 付近を中心とした Maxwell 分布なので、5 MeV 以上の成分は多くないと思われる。

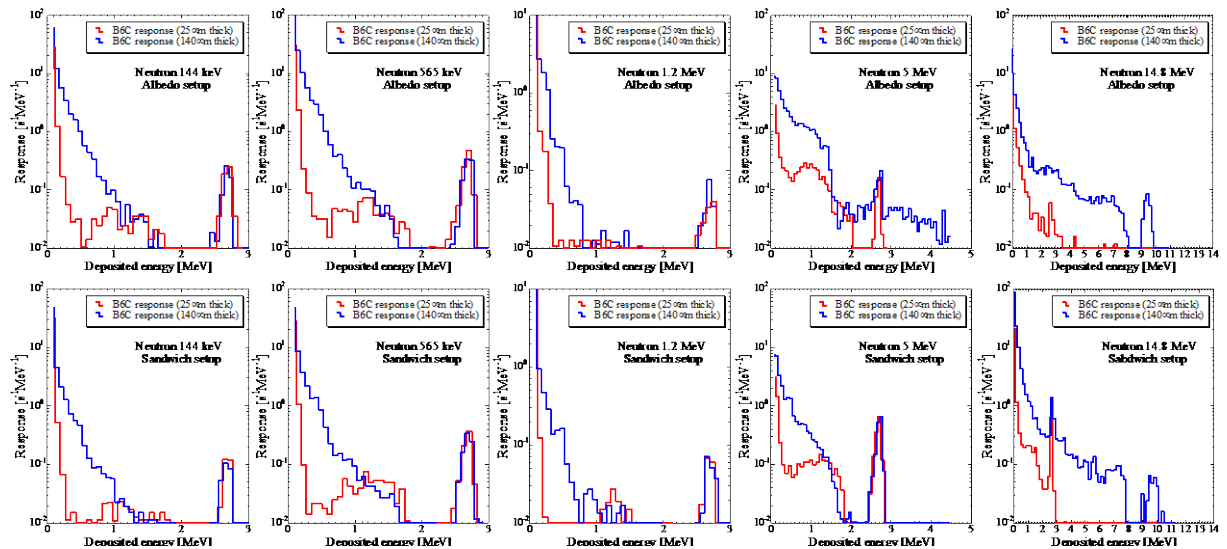


図5 単色中性子入射に対する B6-C 検出器の波高分布 (左から入射エネルギー144 keV, 565 keV, 1.2 MeV, 5.0 MeV, 14.8 MeV)、上半分が Albedo 体系、下半分が Sandwich 体系。

図6に照射体系毎に 25 μm 厚と 140 μm 厚の B6-C 検出器それぞれで測定された ^3H ピーク成分を積分して導出した Albedo 体系の応答関数を例として示す。Albedo 体系では、エネルギーが高くなるほど B6-C 検出器の感度は低くなるが、Sandwich 体系では数 MeV 付近の感度が高くなる結果となった。これは数 MeV の中性子が 15 cm 厚の水ファントムによって減速されて熱化されていることを示している。一方 Albedo の効果はエネルギーが高くなるほど小さくなるので、核分裂自発反応からの中性子の計測には減速の効果を考慮する必要がある。

4. 引用(参照)文献等

[1] N.D. Olympia et al., Nucl. Instrum. Method A714 (2013) 121.