最近の放射線計測技術と その応用

富山高等専門学校 高田英治

本日の内容

1. 放射線計測手法の概要 ① 概論 ② シンチレーション検出器 ③ 無機半導体検出器

2. 最近の放射線計測手法の例
 ① アカメラ
 ② 高速中性子用検出器
 ③ 有機半導体を用いる放射線検出器

放射線計測手法の概要

- ・放射線検出器の種類
 ・電荷として読み出すもの
 ・ガス検出器
 ・シンチレーション検出器
 ・半導体検出器
 - 照射後に光の強度として読み出すもの
 - 熱ルミネッセンス線量計
 - OSL(Optically Stimulated Luminescence)線量計
 - 飛跡として読み出すもの
 - 霧箱
 - 固体飛跡検出器
 - CR-39などプラスチック
 - 原子核乾板

電荷を生成するために 一放射線と物質の相互作用一

- 荷電粒子
 - •物質中を進むと必ずエネルギーを付与する
- γ線•X線
 - 光電効果
 - コンプトン効果
 - 電子対生成
- 中性子
 - 入射した物質との間で反応
 - (n, α)、(n, p)などの荷電粒子生成反応
 - 核分裂反応:核分裂比例計数管(Fission Chamber)

シンチレーション検出器

- ・放射線用蛍光体:シンチレータと高感度光検出器の組合せ
- ・シンチレータ
 - 無機シンチレータ
 - 古典的にはNaI(TI)、CsI(TI)
 - 最近ではBGO、GSO、GAGGなど多数開発され高性能化
 - 主にγ線対象の高感度、高エネルギー分解能を目指したもの
 - 有機シンチレータ
 - 液体
 - プラスチック
 - 高速だが感度は低い
 - 反跳陽子→高エネルギー中性子に感度を有す

シンチレーション検出器用 光検出器(1)

- 光電子増倍管(PhotoMultiplier Tube: PMT)
 - 加速された電子がダイノードに衝突する際に電子増倍
 - 高ゲイン(~10⁶)、高放射線耐性、大型化も可能
- アバランシェホトダイオード(APD)
 - 固体内部での電子増倍
 - ゲイン: 10²程度だが、小型→ポータブル機器

シンチレーション検出器用 光検出器(2)

- Si-PM (Silicon Photomultiplier)
 - 浜ホト製品:マルチピクセルフォトンカウンタ(MPPC)
 - ガイガーモードで動作するピクセル型APDが多数集合した光検出器
 - ゲイン: 10⁶程度を達成
 - 入射可視光の強度によってONになるピクセルが変化
 - → 可視光強度と出力電荷の間にそれなりに線形性が ある
 - → パルス波高計測=エネルギー計測へも適用可能

無機半導体検出器

- 放射線により半導体中にエネルギーが付与
- 電子が価電子帯から伝導体に励起され、電子・ 正孔対が生成される
- それらが電極に収集され、電荷が出力される。

代表的な無機半導体γ線検出器

- HP-Ge検出器(高純度ゲル マニウム検出器)
 - 高感度、高エネルギー分解能
 - 環境γ線計測=核種分析
 - バンドギャップが小さい

 →常温では熱により電子がバンドギャップを超える
 →使用時には冷却する必要がある



代表的な無機半導体γ線検出器

- 常温使用可能な検出器:バンドギャップが大
 - CdTe検出器(バンドギャップ1.52eV)
 - 電子、正孔の移動度の違いが大きい
 - 材料中の深いアクセプタによる電子捕獲→分極現象が課題
 - CdZnTe検出器(1.76eV)
 - CdTeよりも大きいバンドギャップ
 - 分極の影響は小さい
 - Hgl₂検出器(2.13eV)
 - 長所:光電吸収断面積大、大きいバンドギャップ
 - 短所:
 - 低い正孔移動度
 - 短い電荷キャリアの平均流動距離が短い

最近の放射線計測手法 の例

γカメラ

γカメラの研究背景



原·	子	炉	か	6	放射	性物	質カ	「放出
----	---	---	---	---	----	----	----	-----

核種	γ線エネルギー(keV)
¹³¹	365
¹³⁴ Cs	605
¹³⁷ Cs	662



<u>作業員</u>・<u>住民</u>の放射線防護 原子炉建屋内・発電所周辺の空間線量率、放射性物質分布の測定 ※緊急を要するため、迅速な測定が求められる

> 測定時間、測定回数を低減させるために、 高検出効率、広視野、可搬性を持ったガンマカメラが必要

γカメラの可変形状へのニーズ

福島第一原発の事故で放射性物質が発電所内外に分布 円滑に除去作業を進めるには汚染箇所の特定が必要



想定している使用方法



コンプトンカメラの原理



E1、E2を測定散乱角→ θ を計算 $\cos\theta = 1 - mc^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right)$ 複数のコンプトンコーンの重なりから γ 線源の位置を推定

形状可変のための基本体系



傘のような形状の芯材に検出器を設置:散乱体と吸収体 検出器:シンチレータGAGG(1cm³の立方体)を使用 検出器数:散乱体32、吸収体:32

検出器で使用する材料

GAGG: Gadolinium Aluminum Gallium Garnet



計算による特性予測



- 線源:¹³⁷Cs-137点線源
- 線源一散乱体距離D=500 [mm]





実験による評価



計算と実験の違い

- •実験装置におけるノイズ
 - ⇒ Chance Coincidenceの影響
- 今後、これらの要因について検討し、計算結果による実験結果の再現を目指す。
 - ⇒ 計算による形状や測定条件の最適化

高線量率対応化+中性子カメラ への応用 GAGG等の無機シンチレータは密度が大きく高効率 かつエネルギー測定も可能

高線量率場ではパイルアップ等により測定不可能に

エネルギー測定性能を犠牲にし、低密度かつ高速な シンチレータを利用

波形弁別による中性子 / γ線弁別も可能な スチルベン等の有機シンチレータ

波形弁別可能な有機シンチレータ



中性子カメラとしての応答予測



形状可変 γ カメラ: まとめ

- 形状が変化する γ カメラについてシミュレーション 及び実験により特性評価を行い、その可能性を示 した。同体系でシンチレータを変更すれば、高速中 性子カメラとしても使用可能な見通し。
- ノイズのためか、やや実験結果の角度分解能が 劣っているが、今後、ノイズの低減を行う予定。
- シミュレーションによって体系(検出器間距離等)
 の最適化を行う予定。
- 福島第一原発に近い地域で実際に測定を行い、
 現地への適用性を評価する。

核融合中性子検出器

代表的な核融合反応

$D + T \rightarrow {}^{4}He(3.5 \text{ MeV}) + n(14 \text{ MeV})$ 或いは、 α 粒子 中性子

D + D → ³He (0.82 MeV) + n (2.45 MeV) D + D → T (1.01 MeV) + p (3.03 MeV) 注: MeVは、エネルギーの単位。 メガ電子ボルト。

その他、

D + ³He → ⁴He (3.67 MeV) + p (14.67 MeV) p + ⁶Li → ⁴He (1.7 MeV) + ³He (2.3 MeV)

核融合炉における中性子計測

• 中性子発生量および発生率

- ・ プラズマ全体での反応率の推定
 → プラズマの物理現象の理解
- BF₃比例計数管、³He 比例計数管、フィッションチェンバーなどがある
 - 大型・中型トカマクでは、フィッションチェン バーが主流

=反応Q値が大きくBGと区別しやすい

• 中性子エネルギー

- 中性子エネルギーおよび量からプラズマ 中のD、Tの比率を推定

 →14MeVと2.5MeVの弁別
 →エネルギー分解能より統計精度
- エネルギーの広がりからイオン温度、プラ ズマ回転速度などの物理量を推定
 →エネルギー分解能が重要
- 検出器
 - 反跳陽子型検出器+アンフォールディング
 - 反跳陽子磁気分析スペクトロメータ
 - ダイアモンド半導体検出器



Fig. 5 Schematic diagram of the magnetic proton recoil spectrometer[29].

(T. Nishitani et al., J. Plasma Fusion Res. Vol.80、 No. 10(2004)860-869において G. Ericsson et al., Rev. Sci. Instrum. 72, 759 (2001)から引用.)

核融合炉における中性子計測

- 中性子発生分布測定
 - DT プラズマ
 - 中性子発生分布はアルファ粒子の発生分布 を与える

→アルファ粒子の物理研究に非常に重要

- DD プラズマ
 - 中性子発生分布はイオン系の輸送解析に重要なデータ
- マルチチャンネルのコリメータと中性子γ線弁別の可能な検出器の組み合わせ
 - 液体シンチレーション検出器(NE213など)
 - スチルベンシンチレーション検出器
 - シンチレーティング光ファイバー型検出器



Fig. 4 Schematic diagram of the JT-60 neutron profile monitors.

(T. Nishitani et al., J. Plasma Fusion Res. Vol.80, No. 10(2004)860-869)

Sci. Fi.の構造

A Typical Round Scintillating Fiber



Sci. Fi.による高速中性子指向性 検出器の原理

- Sci. Fi.の長尺形状に起因 する高速中性子に対する 固有の志向性
- 中性子入射角度によりSci.
 Fi.中へのエネルギー付与の大きさに違い
- パルス波形弁別により、平 行入射に近い中性子のみ
 を測定可能

- 中性子入射方向から見て 反跳陽子は前方に発生しやすい
- 中性子 反跳陽子



Sci. Fi.に平行に近い角度で中性子が入射 した場合、反跳陽子はSci. Fi.中に多くのエ ネルギーを付与する。

→波高値の大きいパルスが出力



斜めにSci. Fi.に入射すると、反跳陽子は Sci. Fi.の外に飛び出すことが多い→波高 値の小さいパルスが出力



パルス波高弁別により、Sci. Fi. に平行に近い角度で入射した 中性子のみを計測可能

歴史的な開発経緯

- 30年程度前:LANLにおいて開発
- JT-60Uへも適用(その際、東大が協力)









Sci-Fi長の最適化(1)



Sci-Fi長の最適化(2)

- 要因(2)
 - γ線源を用い、Sci-Filc沿った各位置で相互作用を発生
 - 光検出器から離れた位置で発生した可視光は、光検出器までの移動の 際に減衰する
 - あまり長いSci-Fiを用いても可視光が光検出器に到達できない



LHD装置への適用結果







波高分布においてDD中性子+γと DT中性子の2成分を確認 Fission Chamberによる計数と同様 の時間変化を確認

Sci-Fi検出器まとめ

- Sci-Fiを用いる高速中性子検出器を14MeV中性子 計測に適用するため、その長さを最適化した。6cm 程度が最適であることを示した。
- 核融合研LHD、韓国KSTARへ適用し、データを取得した。今後、さらに計測系のbrush-upを行い、安定したデータ取得を継続する予定。
- 高速中性子/γ線の弁別機能を有する同様の検
 出器の開発にも着手予定。

医療応用

放射線の医療応用

- 我々になじみの深いX線撮影以外にも、放射線は 医療分野で広く用いられています。
- 例
 - 核医学検査
 PET検査(Positron Emission Tomography)
 - X線CT
 - 荷電粒子線によるがん治療
 - IVR(InterVentional Radiography)

PET検査の説明の前に

- ・陽電子(Positron、ポジトロン、 e⁺)について
- ・電子:e⁻の反粒子
 - 質量やスピンなどは電子と同じ
 - 電荷がマイナスではなくプラス
- 陽電子の動き
 - 物質中の陽電子は近くにある電子とすぐ結合し、消滅します(電子も消滅)
 - その時に2本のγ線を正反対の 方向に出します。



PET検査

- •目的:
 - 腫瘍やアルツハイマー病の発見など
- 方法:
 - 放射性薬剤
 - FDG(C₆H₁₁¹⁸FO₄フルオロデオキシグル コース)=グルコース(ブドウ糖)に似た薬 物:一部を¹⁸Fで置換:¹⁸Fは陽電子を放出
 - ¹¹C置換アミロイドβ
 - FDGは脳の活動の活発な部位や腫瘍 に集中する特性を持つ
 - 腫瘍→FDGが集中したところ
 - アルツハイマー病→アミロイドβ(¹¹C置 換)の集中が健常者より大きいところ



FDG

FDGの位置の測定

- •¹⁸F:陽電子e⁺(電子の反物質)を放出
- 陽電子は近くにある電子:e⁻と結合し消滅
- 電子、陽電子の質量分のエネルギーがγ線(511keV)
 ×2本として180°方向(正反対の方向)に放出

E=mc²(Cは光速、相対性理論=質量とエネルギーは等価)



消滅γ線の測定

- 患者の周囲を多数の小型検出器で囲う
- •そのうち2つの検出器で測定されたとき、FDGはこれ らの検出器を結ぶ線上に存在
- このような測定を長時間繰り返し、直線を重ねて書くことで腫瘍分布を推定

PET検査、IVRによる被曝量

- PET検査:約2mSv/1回
 - バックグランド放射線による被曝の1年分
- IVR: 皮膚線量は<mark>数Sv/回</mark>に達する場合あり
 - 全身被曝なら死亡するレベル
 - 局所被曝(主に皮膚)なので脱毛等
- どちらもバックグランドから見れば大きい被曝だが、それだけ被曝してもつり合うメリットがある
 - ・
 か射線被曝はリスクとベネフィットの釣り合いで考えることが 重要
- 被曝量を低減するためにより性能の良い<u>測定システムの開発が今も続いています</u>。

本校の取り組み 有機半導体光検出器の応用

- 電子供与体(p)、電子受容体(n)のそれぞれの特性 を示す材料が存在
 - HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital)
 - LUMO (Lowest Occupied Molecular Orbital)
- 励起子
 - 無機材料:誘電率が小さい
 - ワニエ励起子
 - 容易に電子、正孔に分離
 - 有機材料:誘電率が大きい
 - フレンケル励起子
 - 分離が困難
 - →p型/n型の界面に移動 して分離

有機半導体光検出器の構造例

- ヘテロ型: 平板型のp型層・n型層が接触
 - 真空蒸着で作成される場合が多い
 - α-NPD、td-PTCなど低分子材料
 - α -NPD: N,N'-Di(1-naphthyl)-N,N'-diphenylbenzidine
 - td-PTC: ditridecyl perylenetetracarboxylic diimide
- バルクヘテロ型:p型、n型材料を混合して塗布
 - スピンコーティングなど
 - P3HT、PCBMなど高分子材料
 - PCBM: Phenyl-C61-Butyric-Acid-Methyl Ester
 - P3HT: Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)
- 単結晶型
 - 無機半導体と同様に有機半導体単結晶を作成し、電極を形成
 - 励起子の分離は電極付近で発生
 - 単結晶層が厚いため、電圧の印加が不可欠



動作原理

- 1. X線入射→プラスチックシンチレータが可視発光
- 2. 可視発光を吸収し、主にp型有機半導体中に励起子生成
- 3. 励起子の拡散→p/n界面に移動して解離→電子・正孔が生成
- 4. 電荷輸送・収集

配付資料に誤植

バルクヘテロ型有機放射線検出器の製作プロセス(スピンコート法)

- ① Plastic Scintillator上にIZO電極をスパッタ
- PEDOT:PSS溶液をスピンコート
- ③ PCBM:P3HT溶液をスピンコート
- ④ AI電極を真空蒸着

IZO: Indium Zinc Oxide PEDOT: Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) PSS: poly(styrenesulfonate) PCBM: Phenyl-C61-Butyric-Acid-Methyl Ester P3HT: Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)



(外形:10mm角、有感部面積:32mm²)

Al(70nm)
PCBM:P3HT(200nm)
PEDOT:PSS(30nm)
IZO(100nm)
Plastic Scintillator (1mm)



(外形:25mm角、有感部:2mm×4mm×5mm) 47

X線透過像撮影結果





動物用CT装置を用いた実験





実験条件 管電圧:90[kV] 管電流:40,80,120,160,200[μA]

素子データ ▶大きさ:10mm角 ▶有感部:24mm²

X線発生装置による実験

• 素子形状

- プラスチックシンチレータ 10mm×10mm×厚さ1mm
- 有感部面積:4mm×8mm
- 工業用X線発生装置: GE:ERESCO 160MF-4_R
- •加速電圧:50kV(固定)
- 管電流:0.5mA~5mA
- 概ね管電流と発生電流の間に線形的な関係



X線発生装置の管電流と素子からの発生電流の関係 (X線照射時に発生した電流から暗電流を差し引いた電流)

インクジェット法による素子製作

- 将来的な有機半導体検
 出器の応用
 - ・患者の頭や腕への設置
 →曲面への設置や大面積
 化に対応することが要求
- スピンコート法では有機
 PDを曲面や大面積に塗
 布することが原理上難し
 い

⇒ インクジェット法の利用



インクジェット塗布装置 (UIJPS-C-100-LC sn/01501E (Clemia Co. LTD))







ORD-AORD-Bインクジェット塗布装置を用いて製作した素子
(大きさ:10mm角、有感部面積:32mm²)

ODD制作冬件

ORD-C スピンコート法を用いて製作したORD (大きさ:10mm角、有感部面積:32mm²)

ORD番号	ORD-A	ORD-B						
X軸ピッチ[mm]	0.070	0.025						
X軸ドット数	130	380						
Y軸ピッチ[mm]	0.05	0.025						
Y軸ドット数	100	240						



テーブルカメラ撮影結果(ORD-B) 52

白色X線照射実験結果 (溶媒:トリクロロエチレン)



- X線強度とX線誘起電流間に線形に近い関係が得られた
- 製作条件により、**X**線誘起電流の大きさが大きく異なる
- スピンコートにより製作した素子よりも発生する**X**線誘起電流が小さい

有機半導体検出器:まとめ

- X線透過撮影への影響が小さく、かつ測定可能な 電流が発生するX線検出器として開発を進めている
 - CT装置でも十分な電流が観測
 - •実装に向けた検討が必要(電極固定、安定性など)
- インクジェット法での製作可能性を実証
- 有機半導体単結晶を用いる素子についても検討中。バルクヘテロ型よりも性能のよい素子が作製できる見込み。

まとめ

- 福島第一原発廃炉、核融合、医療などに応用可能な放射線検出器の開発を行っています。
- ・
 か射線検出器に関して相談等ありましたら、お声がけ下さい。
- また、放射線計測システムを学習すると、基本的な物理を理解する力とともに、電気・電子回路、ソフトウェア開発に関する能力が身につきます。本校学生の就職についても、どうぞよろしくお願いいたします。