

# 医療用リニアックからの高エネルギー光子線に 含まれる粒子情報計算

産業技術総合研究所 計測標準研究部門

清水森人

## 放射線治療（外部放射線治療）

医療用リニアック装置などを用いて、体の外部からがん腫瘍に高エネルギー光子線・電子線などを照射して、がん細胞を死滅させるがん治療の方法。

粒子線（陽子線，炭素線）を利用する方法もあり，治療が始まっている。

### 特徴

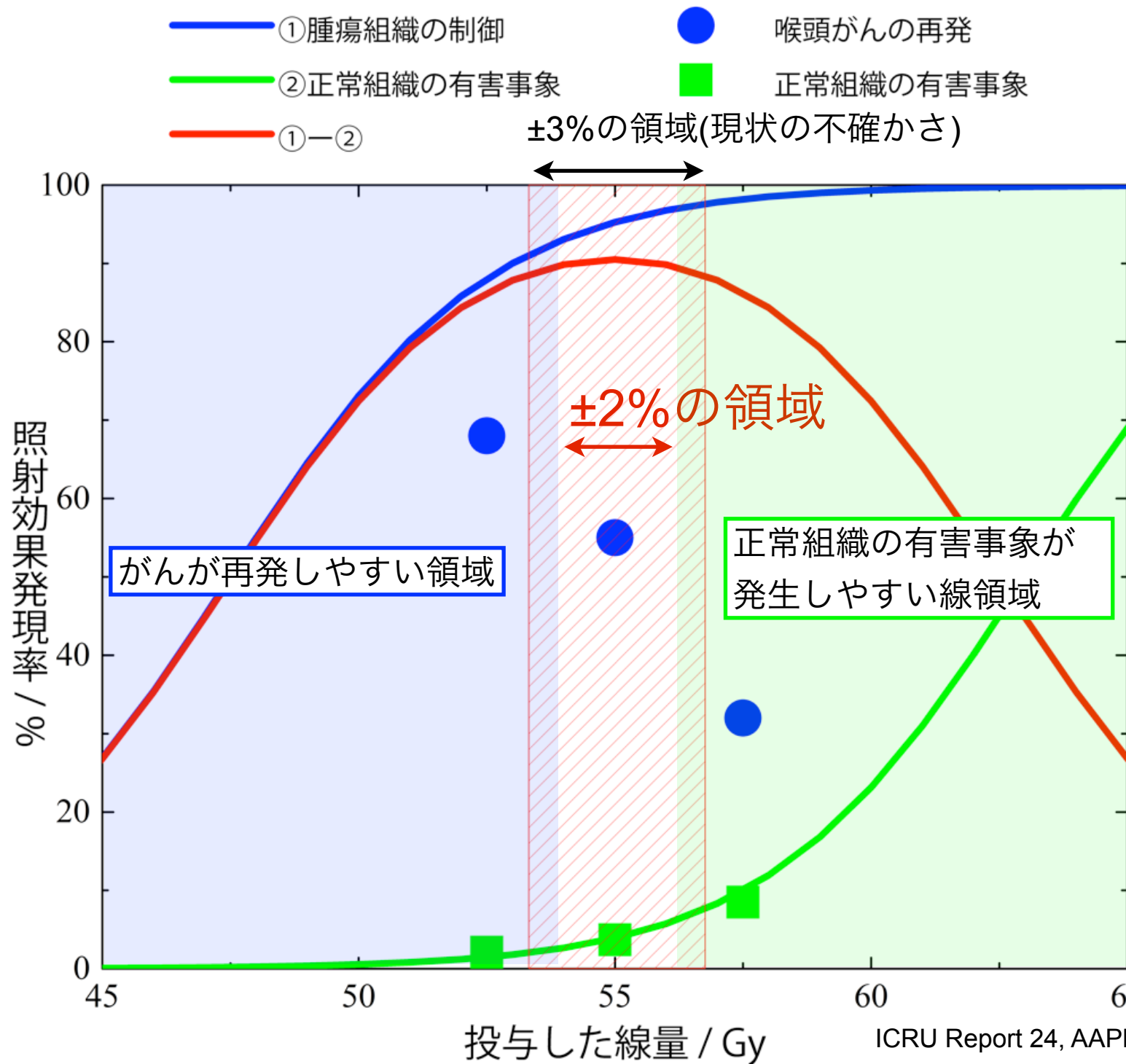
#### 手術が必要ない

- ・ 患者のQOL（生活の質）の低下が少ない  
切除を行わないため，臓器の機能などが維持される
- ・ 入院の必要がない
- ・ 治療期間も短期間（日帰り治療）



医療用リニアック装置

がん罹患者の25%に放射線治療が適用されている



ICRU Report 24, AAPM Report 85

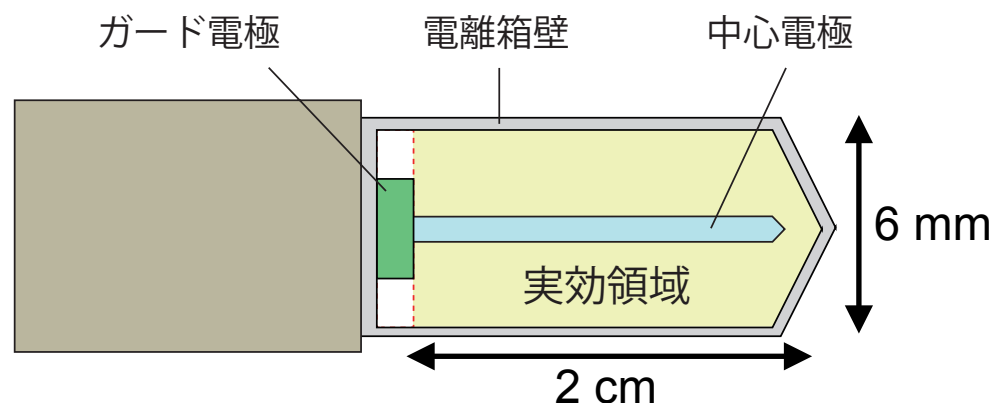
# 医療現場における高エネルギー光子線の水吸収線量計測

放射線治療では細胞の80%が水であることから、放射線から水が吸収するエネルギー（水吸収線量）を基準にして、治療計画を立てている。

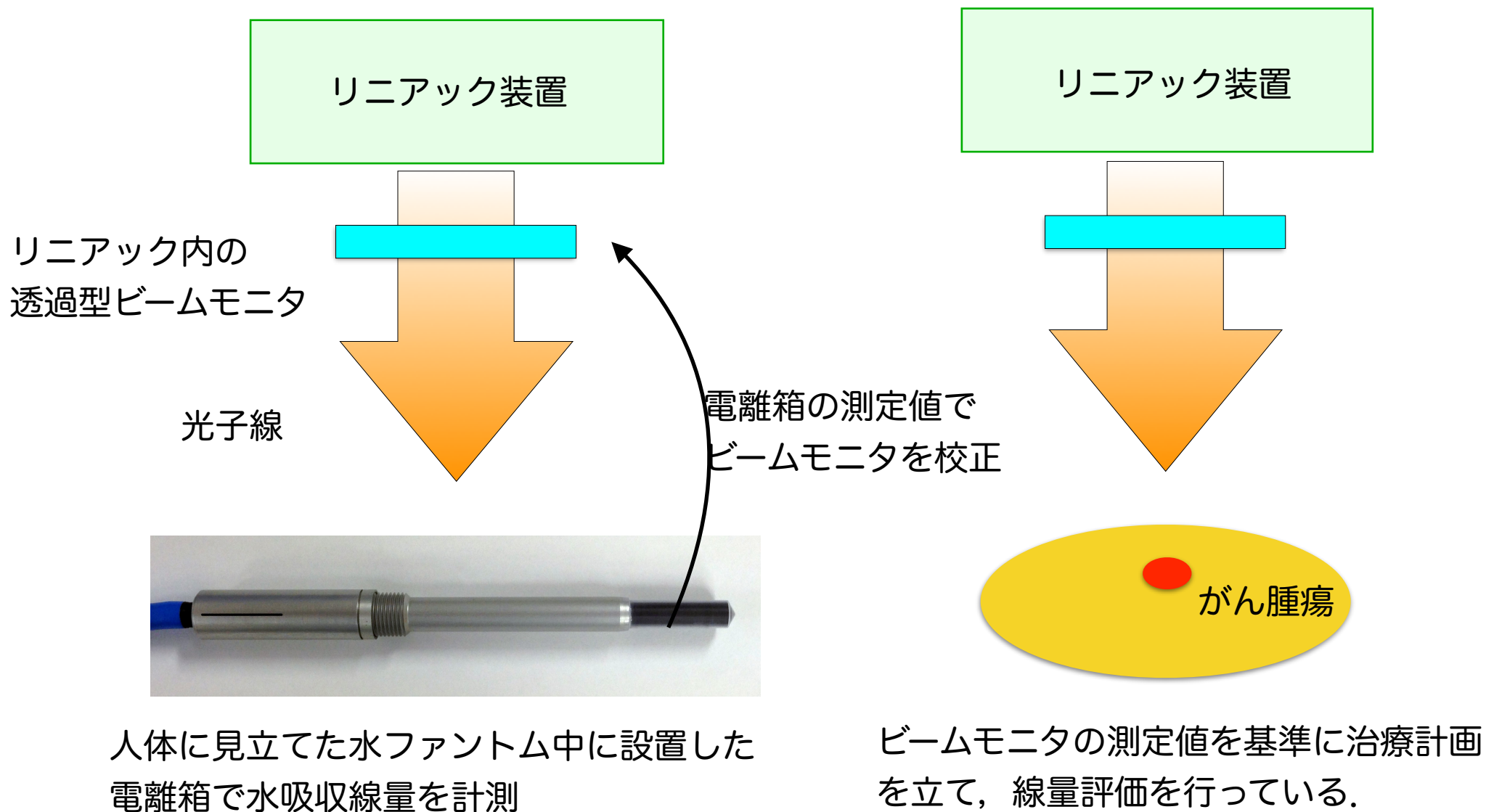
水吸収線量計測の拡張不確かさ(k=2)を2%以下にすることが求められている。

## 測定器：電離箱線量計

放射線によって電離箱の実効領域内の空気が電離されて生じる電荷を収集し、水吸収線量 $D_{\text{water}}$  [ $\text{Gy} = \text{J} / \text{kg}$ ]を計測する。



# 医療現場における高エネルギー光子線の水吸収線量評価



## 電離箱線量計の校正を行うための現在の水吸収線量標準

### Co- $\gamma$ 線水吸収線量標準

Co- $\gamma$  線の水吸収線量をグラフイトカロリメータで測定し、その値を標準として電離箱線量計の校正を行っている。



校正定数の拡張不確かさ(k=2): **0.8 %**

グラフイトカロリメータ



肝心の医療現場での計測では…

医療現場における水吸収線量計測の拡張不確かさ(k=2): **2.9 %**

不確かさの主要因

Co- $\gamma$  線と治療に使う高エネルギー光子線の線質の違い

Co- $\gamma$  線と高エネルギー光子線は線質が異なるため、電離箱の測定値に対して計算による感度補正（線質変換係数:  $k_Q$ ）が必要だが、この感度補正の不確かさが大きい。

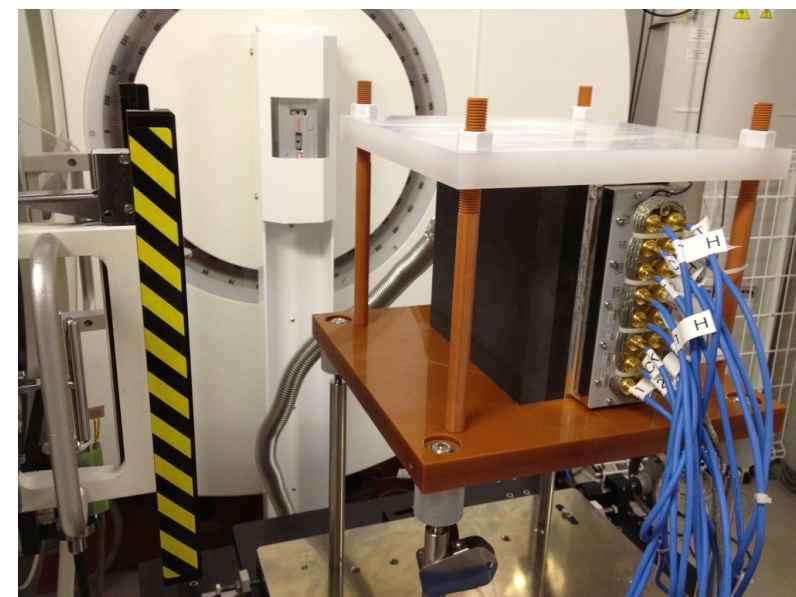
**高エネルギー光子線で直接校正する技術が必要**

# グラフアイトカロリメータ (国家標準器)

## 特徴

- ・ 吸収線量の定義に近い測定が可能
- ・ 吸収体 (コア) にグラフアイトを使用  
水に比べて
  - ・ 比熱が小さい
  - ・ 熱欠損が少ない
  - ・ 取り扱いが容易

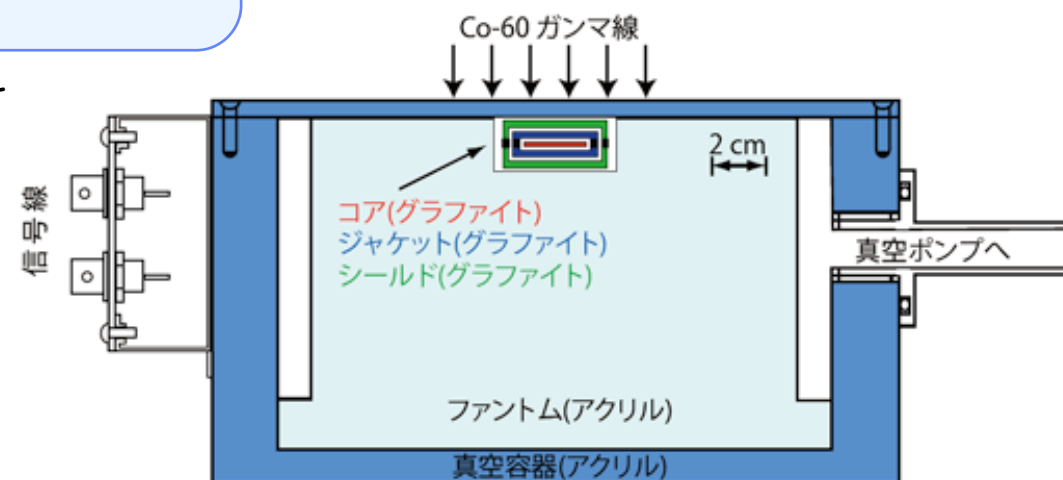
コアに取り付けた熱抵抗温度計をホイートストーンブリッジに接続して温度測定を行う



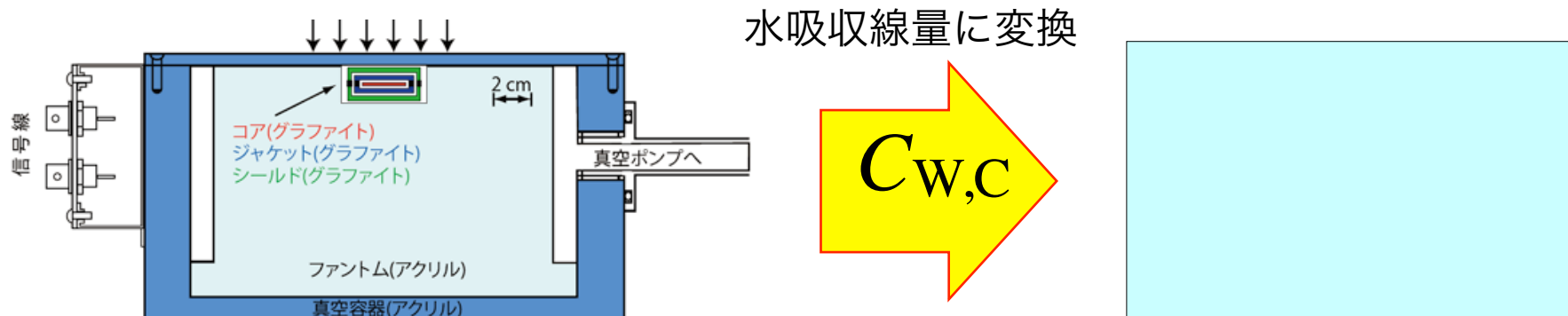
グラフアイトカロリメータ

各グラフアイト素子にはヒーターが取り付けられており、ヒーターの動作を変えることで2つの測定モードが可能

- ・ 等温測定モード
- ・ 準断熱測定モード

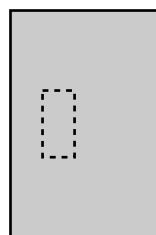


# 測定したコアの吸収線量を水吸収線量に補正する

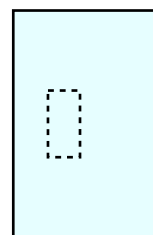


$$C_{W,C} = \frac{Q_W}{Q_C} \left( \frac{D_W / D_C}{Q_W / Q_C} \right)_{MC}$$

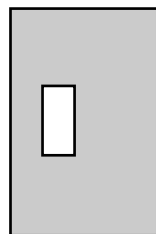
( )<sub>MC</sub>内は大規模並列計算によるモンテカルロシミュレーション計算によって導出



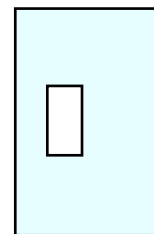
$D_C$  : コアの吸収線量



$D_W$  : 水吸収線量



$Q_C$  : カロリーメータファントムに設置した電離箱による測定電荷



$Q_W$  : 水ファントムに設置した電離箱による測定電荷

# 高エネルギー光子線の従来の計算

- ・ 解析的計算

実験データ，経験式などを用いて，解析的に補正係数を導出する手法→**手続きが明確なため検証が容易，複雑なものは計算できない**  
※放射線源からの放射線の計算は非常に得意

- ・ モンテカルロ計算

モンテカルロ法で計算する手法→**複雑な計算が得意，計算時間を短縮するためにリダクションなどを多用し，検証が難しい（マジックブラックボックス）**  
計算の元になる光子データも $10^8$ 個程度の光子データを数百～数千回使い回して計算を行う

大型計算機を用いることで，リダクションなどを極力行わずに詳細な高エネルギー光子線の計算を行う

# 高エネルギー光子線の特性データをリダクション などを使わずに収集する

## 九州大学情報基盤研究開発センター

- ・ 高性能演算サーバーシステム (TATARA)

機種：富士通 PRIMERGY CX400

使用ノード数：32ノード (512コア)

演算能力：11.1 TFLOPS

- ・ スーパーコンピュータシステム (HAYAKA)

機種：富士通 PRIME HPC FX10

使用ノード数：192 ノード (3072コア)

演算能力：45.4 TFLOPS



富士通 PRIME HPC FX10

HPCI利用研究課題 (hp120020)および九州大学先端的計算科学研究プロジェクトの支援を受けています。

大型計算機の大容量のメモリ，ストレージ領域を活用して，不純物などの情報を詳細に反映させたモンテカルロ計算を行い，補正係数を導出した。

目標量：光子データ $10^{10}$ 個分，最終的な補正係数導出に必要な量の10分の1。

# EGS5による高エネルギー光子線の特徴計算

## 計算条件

- ・ 計算コード

EGS5 ver. 1.0.4 + EGS5-MPI

- ・ ジオメトリ情報

Elekta社から提供された資料から作成

- ・ Cutoff設定

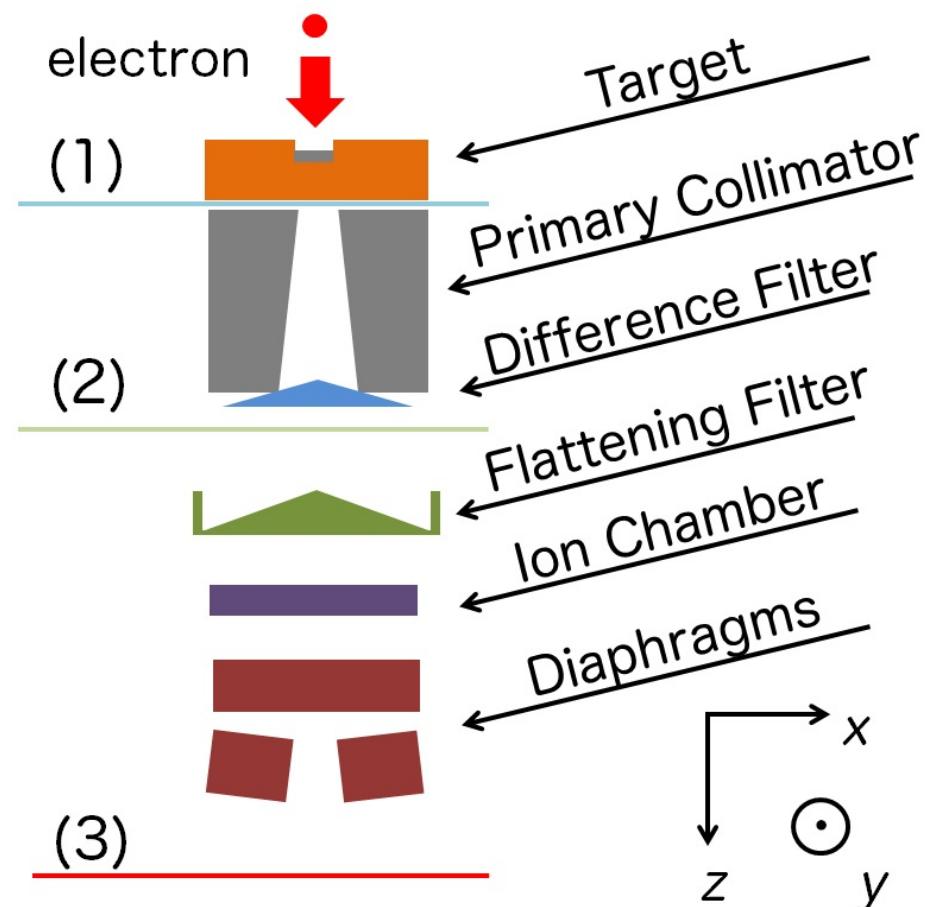
ecut = 0.700 MeV

pcut = 0.010 MeV

- ・ Range rejection

ターゲット: esave = 0.700 MeV

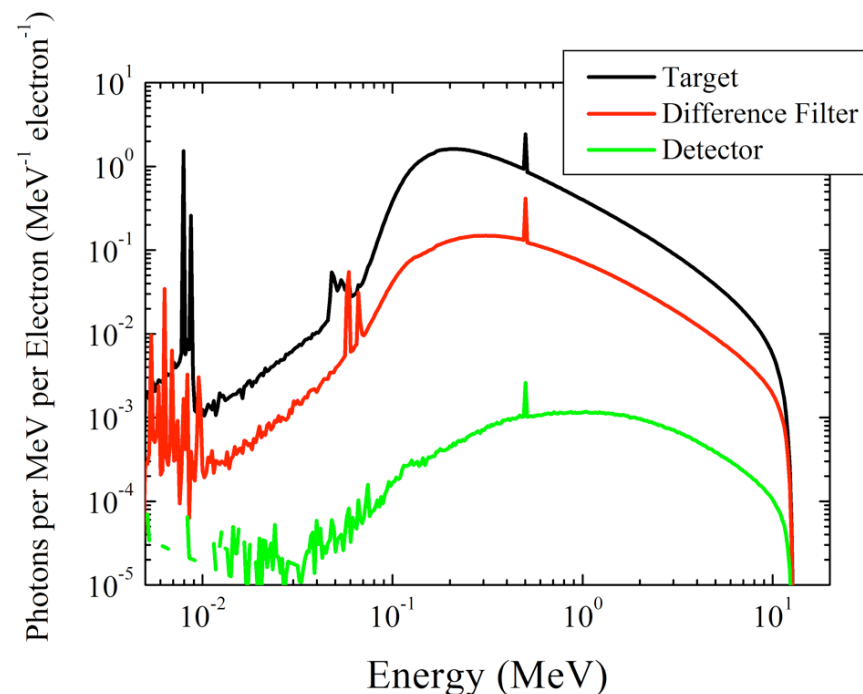
それ以外: esave = 2.0 MeV



照射野  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  の条件で計算し、(3) の位置で光子情報を記録  
HDDに個々の粒子（光子，電子，陽電子）を全て保存

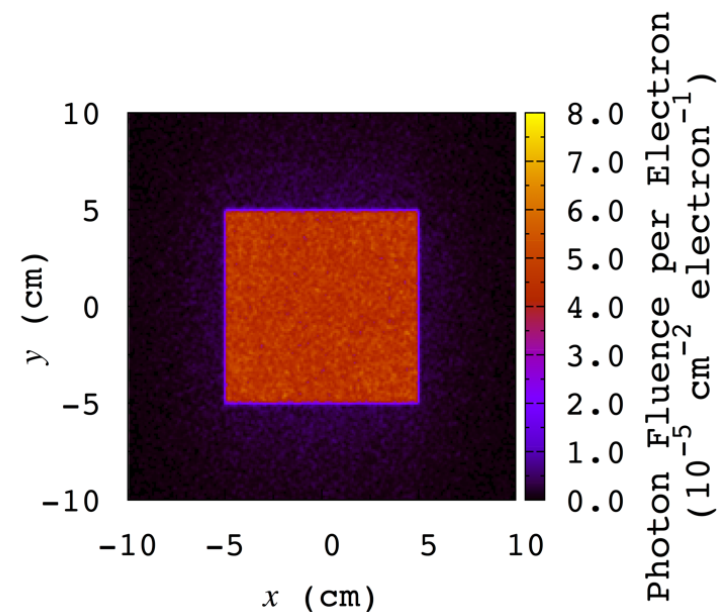
## エネルギースペクトルの特徴

- 主成分は連続X線
- 陽電子消滅  $\gamma$  線のピークが強く見える
- 特性X線の成分はフィルター部で吸収
- 総カウント数は入射電子数の2桁落ち

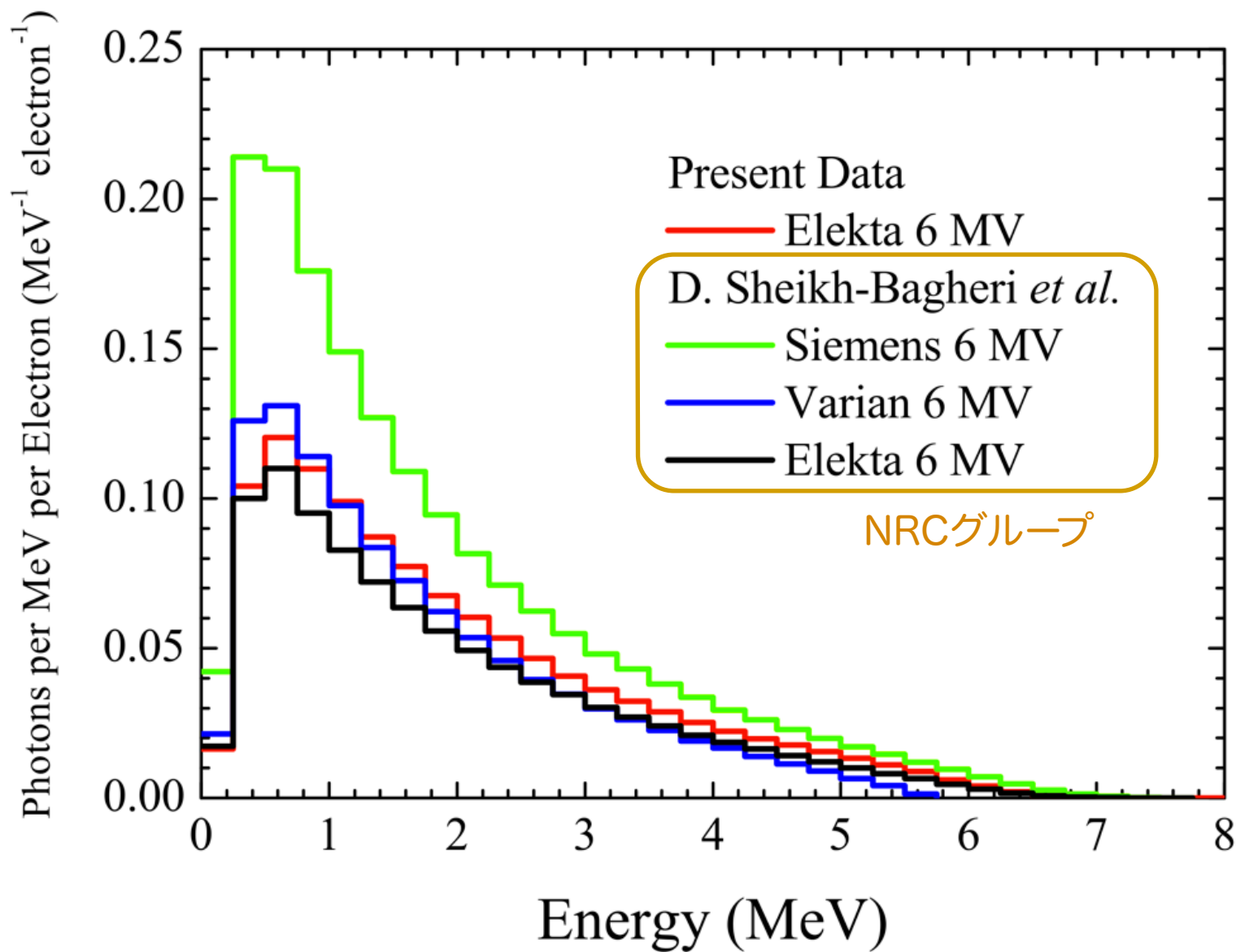


## 光子フルエンス

- 全体に均一に分布
- 照射野の形状をよく再現
- 陽電子消滅  $\gamma$  線と見られる成分が照射野外に見られる



## 6 MV 光子線のエネルギー分布



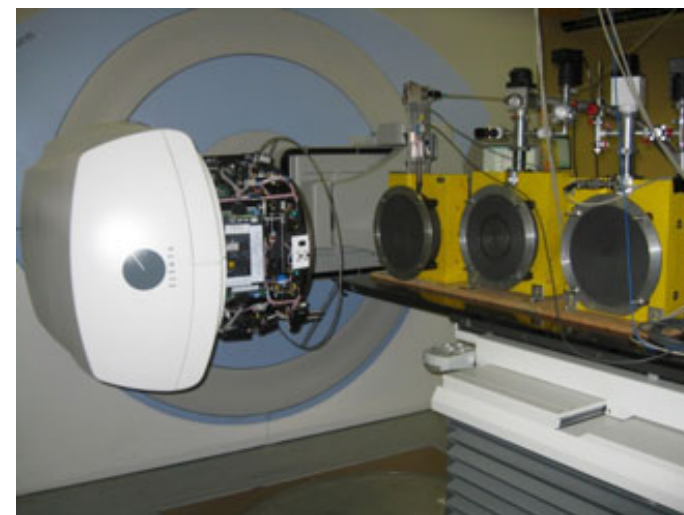
# オーストラリアとの国際比較

開発中の高エネルギー光子線の水吸収線量標準の値が他国の標準の値に比べて妥当かどうか、BIPMとの国際比較を済ませているオーストラリアの標準との国際比較を行って確認した。

## オーストラリアの水吸収線量標準

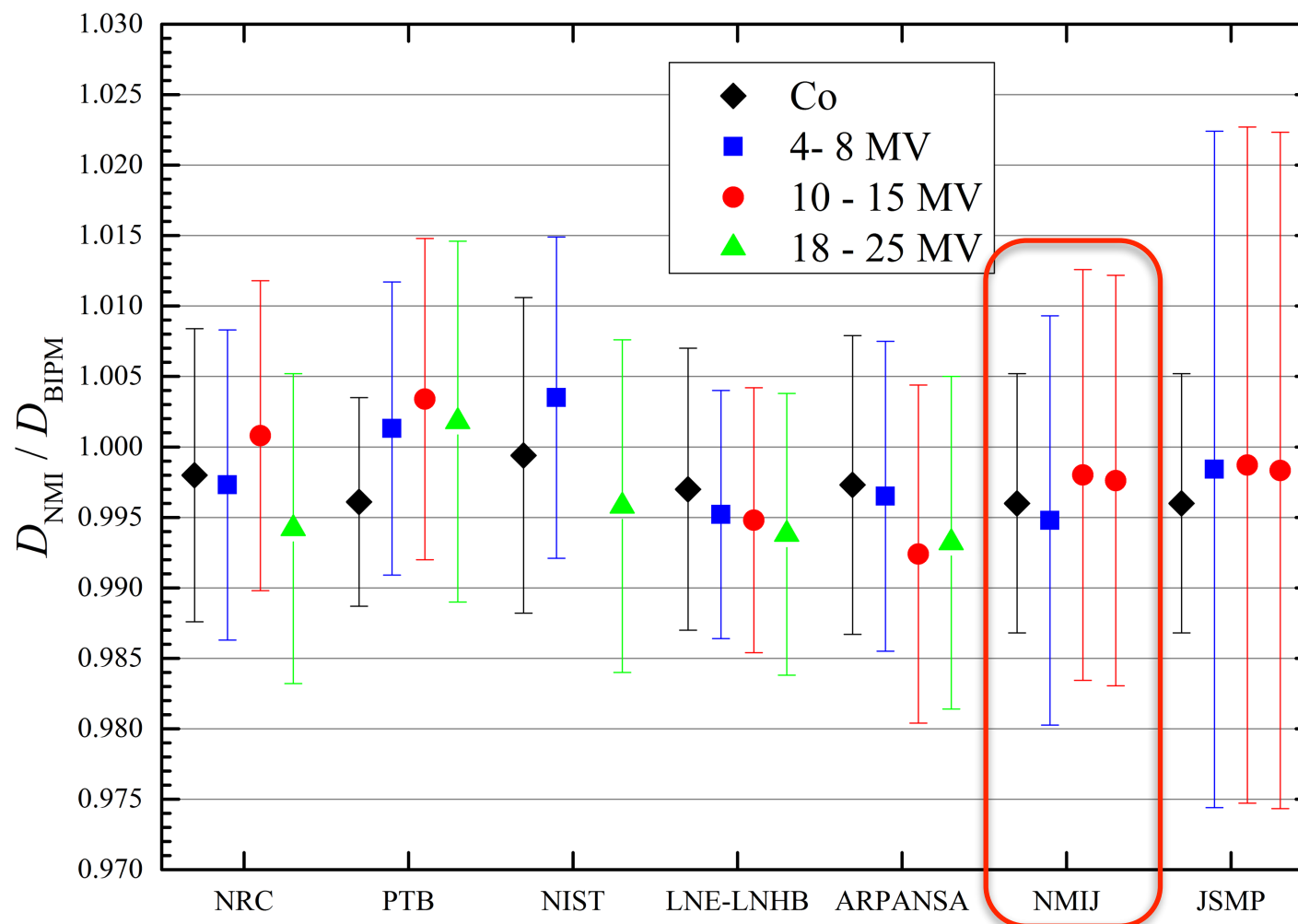
種類：グラフィトカロリメータ  
 リニアック装置：Elekta Synergy  
 線質：6, 10, 18 MV 高エネルギー光子線

オーストラリアの水吸収線量標準を管理しているARPANSAのリニアックは4~25 MVまで全ての高エネルギー光子線が出せる



ARPANSAのリニアックとカロリメータ

# 高エネルギー光子線水吸収線量の測定結果 (国際比較結果速報値)



高エネルギー光子線の水吸収線量標準は各国の平均値に対してよく一致

## まとめ

- ・  $10^{10}$ 個分の高エネルギー光子線のデータをリダクションなどを用いないモンテカルロシミュレーションによって収集した。
- ・ 得られた高エネルギー光子線のデータを用いて高エネルギー光子線水吸収線量標準であるグラフィトカロリメータの補正係数を導出し、不確かさ0.4%での高エネルギー光子線水吸収計測を実現した。

## 今後の予定

本研究で得られた光子線データは高エネルギー光子線の散乱X線，汚染電子，光子線の不均一分布などの情報を大量に含んでいる

- ・  $10^9$ 個分と $10^{10}$ 個分のデータを元にそれぞれ $10^{11}$ 個分の高エネルギー光子線を発生させたときの計算結果の比較
- ・ 不均一分布を考慮することで，現場標準器用の補正係数を導出
- ・ 水，グラフィトの平均励起エネルギーの決定

に取り組んでいく