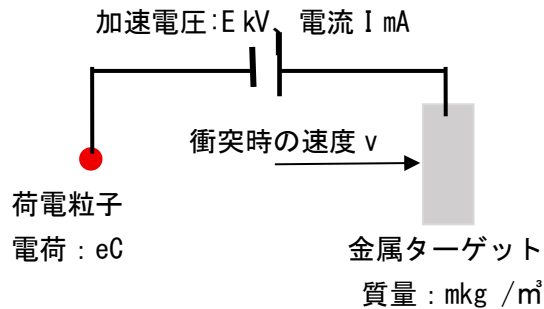


電子加速と陽子加速の比較検証

非常にラフな検証ですが、おおよその患者の照射位置におけるサーマル中性子の強度を求めました。加えて、電子加速と陽子加速の比較検証を行いました。今後厳密なシュミレーションを行う予定です。ご参照に資してください。

1. 荷電粒子のターゲットへの衝突時の全エネルギーと速度の比較



加速電圧: EkV [kV]

電流: ImA [mA]

実際の電圧・電流 (SI 単位) とすると、 $V=10^{+3} EkV[V]$, $I=10^{-3} ImA[A]$

- ・消費電力 (電源から見た電力)

電子銃+ターゲットに供給される電力は $P_{in}=VI=(10^{+3} EkV) (10^{-3} mA)=EkV ImA [W]$

- ・ターゲットに到達した電子 1 個あたりの運動エネルギー

電子 1 個の運動エネルギーは $E_e=eV=e \cdot 10^{+3} EkV$

エネルギーを keV で書くと、 $E_e=EkV keV$

- ・衝突時の電子の運動エネルギーを速度 (v) を用いると、

$E_e=EkV keV=1/2 \times m \cdot v^2 keV$

- ・同一加速条件での電子と陽子との比較

衝突時の運動エネルギーは加速条件で決まる事より、同じとなる。

しかし衝突時の速度は陽子は電子に比べて、 $1/\sqrt{1,840}$ 小さくなる。

- ・すなわち、運動エネルギーは同じでも、衝突時の速度は小さくなり、侵入深さも小さく、(p、n) 核反応の確率も小さくなる。

2. 電子線加速のターゲットの発熱量

- ・電子 1 個の運動エネルギー

$E_e=EkV keV=1.602 \times 10^{-16} EkV [J]$

- ・ターゲット内で消費されるエネルギー (総量)

$P_{target, total} \approx EkV ImA [W]$

- ・ターゲット内で発熱するエネルギー

$P_{heat} \approx (1-\eta) EkV ImA [W]$

- ・ 25MV、1mA の加速条件で電子を加速した時の発熱量
ターゲットをタングステン (Z=74) と仮定すると、制動放射効率は $\eta \approx 0.15$ とする。
- ・ 入力電力は 25KW、約 3.75kW 分が X 線の発生に寄与し、21.25KW 分が熱に変換。
→ターゲットの冷却システムが重要 過去の経験から回転ターゲットの採用で解決見込み。
- ・ これに対して、陽子の場合 (25MV、1mA 加速) は制動放射などの他に熱として換算される機構が無いために、すべての入力エネルギーが熱に変換される。すなわち発熱量は 25KW となる。

3. 陽子線加速と電子加速での中性子の発生割合の比較

- ・ 陽子線の場合

陽子数 (毎秒) ビーム電流 1 mA の陽子数は

$$I = 1 \text{ mA} = 1 \times 10^{-3} \text{ A}$$

$$N_p = Ie = 1 \times 10^{-3} / 1.602 \times 10^{-19} \approx 6.24 \times 10^{15} \text{ protons/s}$$

中性子生成数の見積もり

$$Y = 1 \times 10^{-3} \text{ n/p} \quad (\text{ターゲットに Li を用いた場合、陽子 1 個当たりの中性子の発生割合})$$

$$N_n = 6.24 \times 10^{15} \times 10^{-3} \approx 6.2 \times 10^{12} \text{ n/s}, \rightarrow N_n = 5 \times 10^{12} \text{ n/s とする。}$$

エピサーマル中性子束

幾何学的取り出し効率 (固有立体角) :

ターゲットから全方向 4π に出る中性子のうち、ビームライン方向に取り出せるのはせいぜい **数%~十数%** 程度と考えるのが自然。ここではざっくり **10%** とした。

減速・フィルタ・コリメーションによる損失 :

高速中性子 → エピサーマル帯への減速

γ 線・熱中性子・高速中性子の除去

ビーム形状の整形などでさらに減ります。

エピサーマル成分として残るのを **全体の 30%** と仮定。(ここも設計依存が大きい)。

エピサーマル中性子束の総数

$$N_{epi} \sim N_n \times \epsilon_{geom} \times \epsilon_{epi} \quad (\epsilon_{geom} = 0.1, \epsilon_{epi} = 0.3)$$

中性子源強度を $5 \times 10^{12} \text{ n/s}$ と中間値で置くと :

$$N_{epi} = 5 \times 10^{12} \times 0.1 \times 0.3 = 1.5 \times 10^{11} \text{ n/s}$$

ビーム断面積から中性子束に変換 (照射位置でのエピサーマル中性子束の数)

例えば、照射野が直径 10 cm の円形ビームだとすると :

半径 $r = 5 \text{ cm}$

$$\text{面積 } A = \pi r^2 \approx 3.14 \times 25 \approx 78.5 \text{ cm}^2$$

エピサーマル中性子束は

$$\Phi_{epi} = N_{epi} / A \approx 1.5 \times 10^{11} / 78.5 \approx 2 \times 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{s}$$

- ・ 電子線の場合

中性子生成数

高エネルギー電子リニアック+W ターゲットでの「中性子生成効率」のオーダーは、だいたい、 $Y_{n/e} \sim \text{数} \times 10^{-3} \text{ n/electron}$ ここでは $Y_{n/e} = 3 \times 10^{-3}$ と仮定。

中性子生成数のオーダー

$$N_n \approx N_e \times Y_{n/e} = 6.2 \times 10^{15} \times 3 \times 10^{-3} \approx 1.9 \times 10^{13} \text{ n/s} \rightarrow N_n \approx 1.0 \times 10^{13} \text{ n/s} \text{ とする。}$$

エピサーマル中性子束の総数

$$N_{epi} = N_n \times \epsilon_{geom} \times \epsilon_{epi} \quad (\epsilon_{geom} = 0.1, \epsilon_{epi} = 0.3)$$

中性子源強度を $N_n \approx 1.0 \times 10^{13} \text{ n/s}$ で置くと：

$$N_{epi} = 1.0 \times 10^{13} \times 0.1 \times 0.3 = 3 \times 10^{11} \text{ n/s}$$

ビーム断面積から中性子束に変換する

例えば、照射野が直径 10 cm の円形ビームだとすると：

半径 $r = 5 \text{ cm}$

面積 $A = \pi r^2 \approx 3.14 \times 25 \approx 78.5 \text{ cm}^2$

エピサーマル中性子束は

$$\Phi_{epi} = N_{epi} / A \approx 3 \times 10^{11} / 80 \approx 3 \times 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{s}$$

4. 電子加速と陽子加速の発生エピサーマル中性子数の比較

- 25MV, 1mA の加速条件で、BNCT に有効なサーマル中性子の単位面積、単位時間当たりの発生数

電子加速： $3 \times 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{s}$

陽子加速： $2 \times 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{s}$

- ほぼ同じオーダーの BNCT 用エピサーマル中性子が発生する。
- いずれも BNCT の照射に必要な条件は、25MV 過疎良く、1mA で得られることが予測された。
- 鬼柳先生からの情報、

加速方式の単位エネルギーでの比較、オーダー的には強度はコンパラ

