

2016年3月2日
光量子計測器ワークショップ

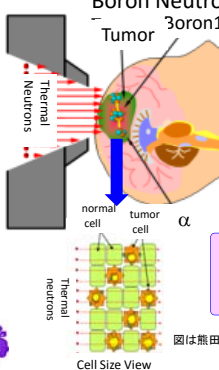
BNCT治療と計測器

筑波大学
陽子線医学利用研究センター
(PMRC)
安岡 聖




What is BNCT?



Boron Neutron Capture Therapy



① Boron-10 is integrated into tumor cells with a help of BPA drugs.
② Thermal neutrons irradiated to the tumor cells.
③ Only the tumor cells are selectively damaged with powerful α and Li particles generated in the reaction of thermal neutron and boron-10 particles.

**Ultimate
Internal Heavy Ion Therapy
with α and Li particles**


図は熊田博明, RIST News .56, 14-24(2014)より引用

原子炉から小型加速器へ

日本における原子炉新設が容易でない中、原子炉の病院併設は非現実的


日本原子力機構JRR-4



病院に併設困難



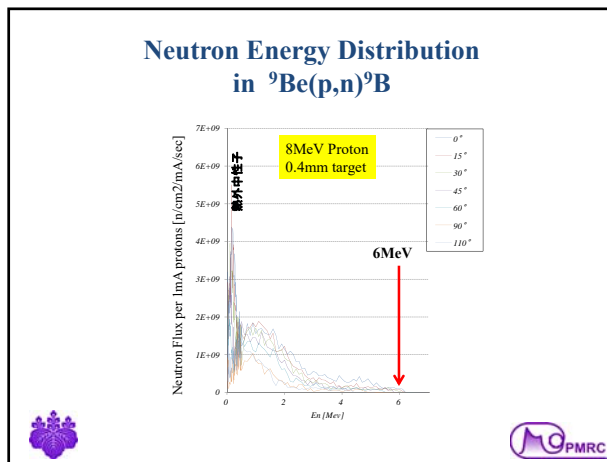
図は日本原子力機構資料より引用

陽子線リニアック



病院に併設可能

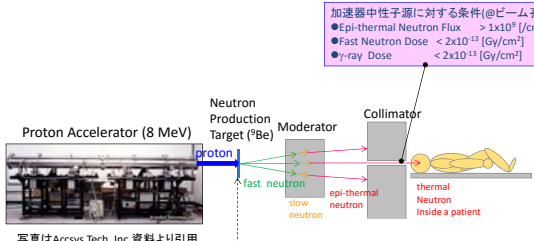
写真はAccsys Tech. Inc.資料より引用

陽子線加速器を使った中性子源



加速器中性子源に対する条件(@ビーム孔):

- Epi-thermal Neutron Flux $> 1 \times 10^9$ [$\text{J}/\text{cm}^2/\text{s}$]
- Fast Neutron Dose $< 2 \times 10^{-13}$ [Gy/cm^2]
- γ -ray Dose $< 2 \times 10^{-13}$ [Gy/cm^2]

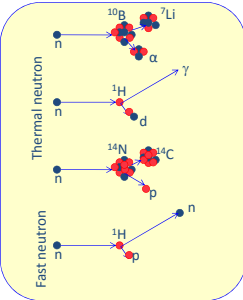


写真はAccsys Tech. Inc.資料より引用

Nuclear Reaction	E_p [MeV]	N_n/N_p	Melting Point [$^{\circ}\text{K}$]	E_n [MeV]
$^{10}\text{Be}(p,n)^{10}\text{B}$	8	1.6×10^{-4}	1278	0.1-6

Dominant Reactions of Thermal Neutron in a Patient





$^{10}\text{B}(n, \alpha)^{7}\text{Li}$

$^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$

$^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$

$^1\text{H}(n, p)n$

Boron-Thermal Neutron Reaction

$$n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^7\text{Li}^* + \alpha \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma + \alpha$$

Boron10 on BPA drugs integrated into tumor cells

Stopping and depositing Their energy inside this tumor cell

γ 478 keV

● proton
● neutron
● electron

What is Boron (^{10}B)-dose?

Kerma coefficient: Averaged energy E_T deposited into this volume of mass m for 1 n: (calculated in PHITS)

$$n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^7\text{Li}^* + \alpha \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma + \alpha$$

$$f_{n, {}^{10}\text{B}}(E_n, 1\text{ppm } {}^{10}\text{B}) [\text{J/kg/n}]$$

$D_{B, 1\text{ppm}} = \int_{E_n} f_{n, {}^{10}\text{B}}(E_n, 1\text{ppm } {}^{10}\text{B}) \phi_n(E_n, t) dE_n dt$

$$\approx 7 \sim 10 \times 10^{-14} [\text{Gy/ppm}]$$

Boron Dose/H. Dose/N. Dose/ γ Dose

ED [GyEq] = $C_B \cdot D_{B, 1\text{ppm}} \cdot CBE_B + D_N \cdot RBE_N + D_H \cdot RBE_H + D_\gamma \cdot RBE_\gamma$

Note: RBE & CBE actually depend on dose, dose rate, and surviving fraction. Photon-isoeffective dose has improved this problem.
((Ref.) Rad. Res. 178, 609-621 (2012))

図は熊田博明、Radioisotopes, 64, 39-48(2015)より引用

Boron Dose/H. Dose/N. Dose/ γ Dose

Micro Dose Distribution

Equivalent dose = Boron Dose + Non-boron Dose

${}^{10}\text{B}(n, \alpha) {}^7\text{Li}$

γ dose ${}^1\text{H}(n, \gamma) {}^1\text{H}$

N. dose ${}^{14}\text{N}(n, p) {}^{14}\text{C}$

H. dose ${}^1\text{H}(n, p) {}^1\text{H}$

ホウ素線量をどのように測定するか

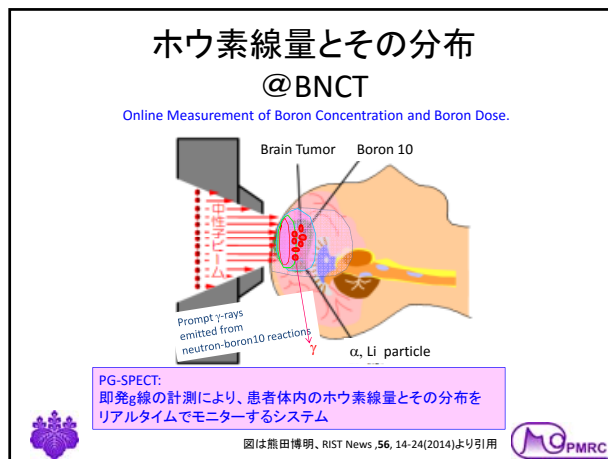
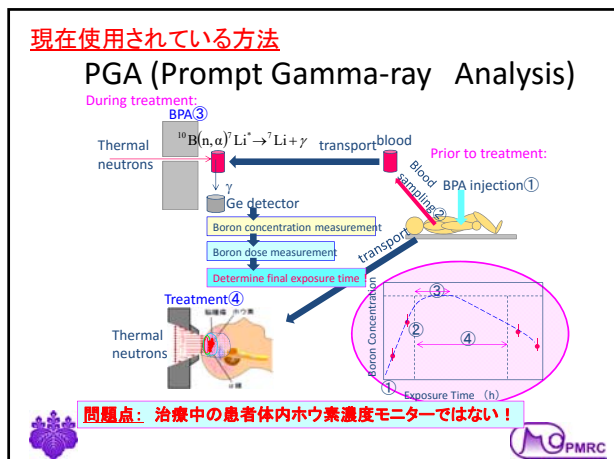
ホウ素線量測定に必要なもの

必要事項	マイクロ・ホウ素線量	マクロ・ホウ素線量
エネルギー分解能	< 6%	< 6%
空間分解能	< 10 μm	~数mm
カバー範囲 15 cm x 15 cm	細胞レベルまでの多チャンネル化は予算的に困難!	容易
患者の動きに対する安定性(robustness)	弱い(安定させるには細胞追跡等の新たな技術の導入が必要)	強い(数ミリ四方の範囲の平均値を計測)

現在の技術で、

- ① γ 線のエネルギーと位置を同時に計測
- ② 治療中の患者体内ホウ素線量の線量・線量分布計測
- ③ 患者(細胞)の動きにも対応

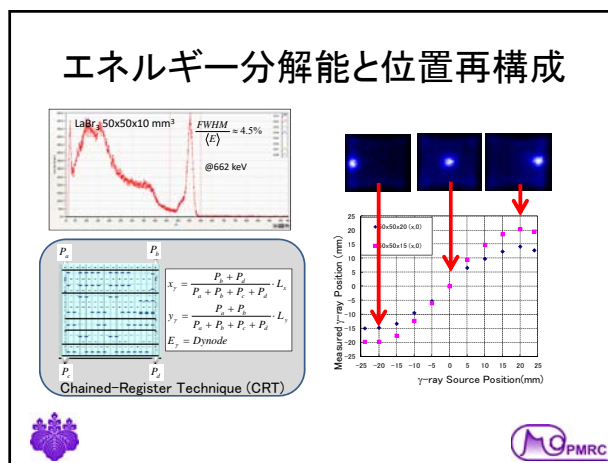
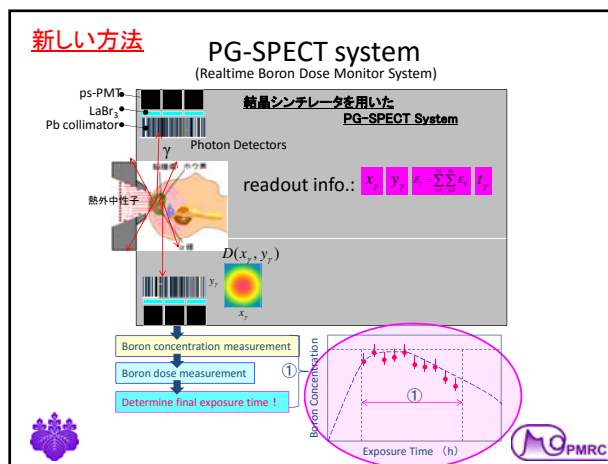
が可能な γ 線計測器として、
LaBr₃結晶シンチレータと多チャンネルPMTを組み合わせた γ 線計測器の開発

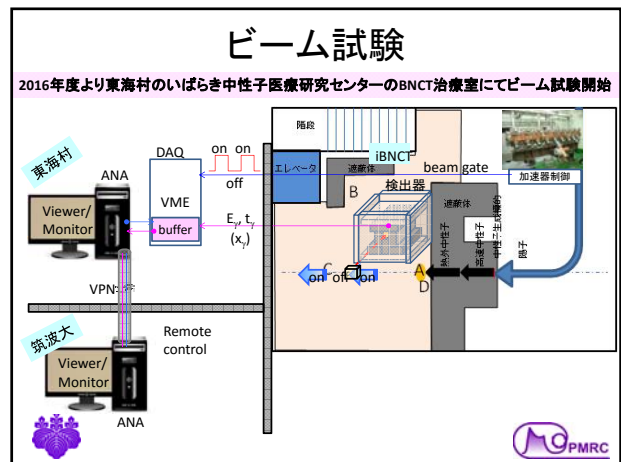
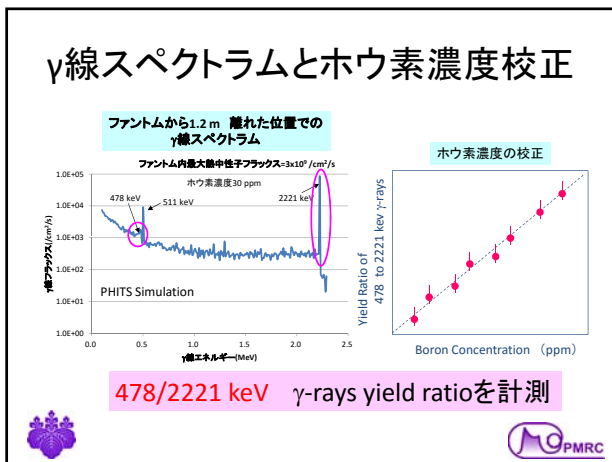
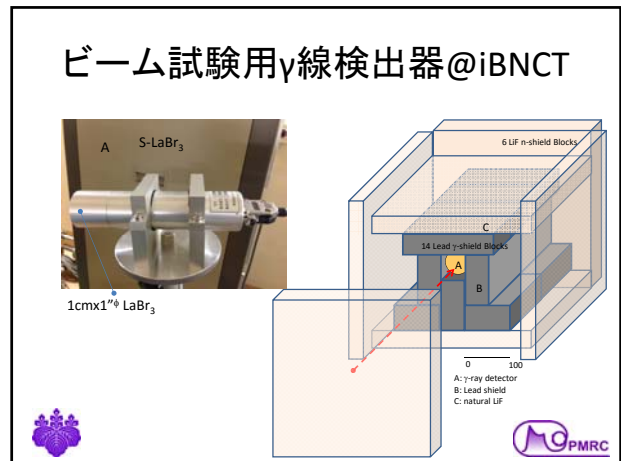
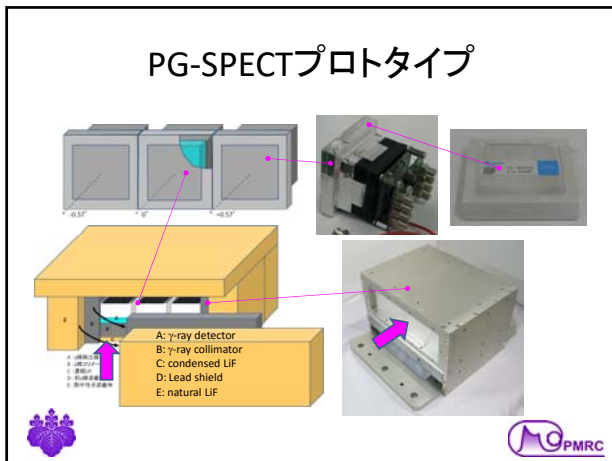


PG-SPECTに要求される機能・性能

- エネルギー分解能 < 6%
- 空間分解能 < 5mm
- 対応可能な γ 線レート > 100kcps
- Pb collimator, LiF n-shield 等による中性子 & γ 線 (特にコンプトン γ 線) の低減
- コンプトン γ 線BG上に現れる478/ 511/ 2221 keV γ 線に対する高レベルの弁別及び計数能力

478/2221 keV γ -rays yield ratio





- ### まとめ
- いばらき中性子医療研究センター(東海村)におけるBNCT治療にて、照射線量のうち最も重要なホウ素線量をリアルタイムでモニターし、照射時間の決定に使用するため、筑波大学陽子線医学利用研究センターはLaBr₃結晶を用いたPG-SPECT計測器の開発を行っている。
 - H28年度からこの計測器に対して中性子ビーム試験を開始し、ホウ素濃度とその空間分布の決定に対するこの計測器の実用性を検証する。