

宇宙線 x 中性子 = 照射場と検出について

京都大学複合原子力科学研究所
粒子線腫瘍学研究センター
粒子線医学物理学研究分野
田中浩基

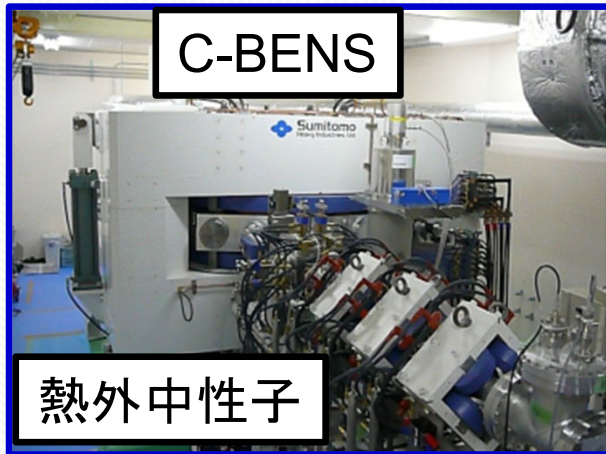
2026年3月30日、31日宇宙線x□□□研究会

京都大学複合原子力科学研究所



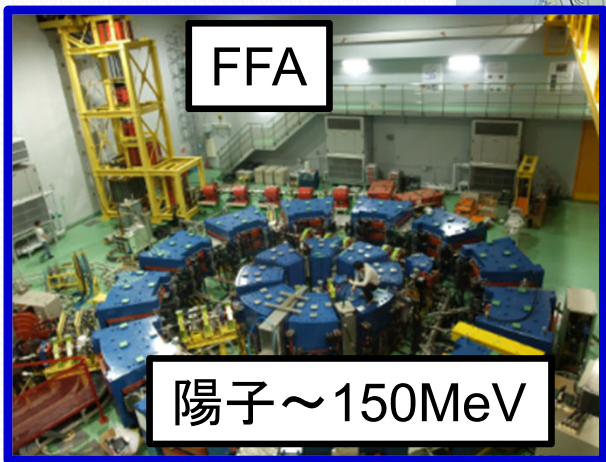
KURNS-LINAC

パルス中性子源、電子、X線



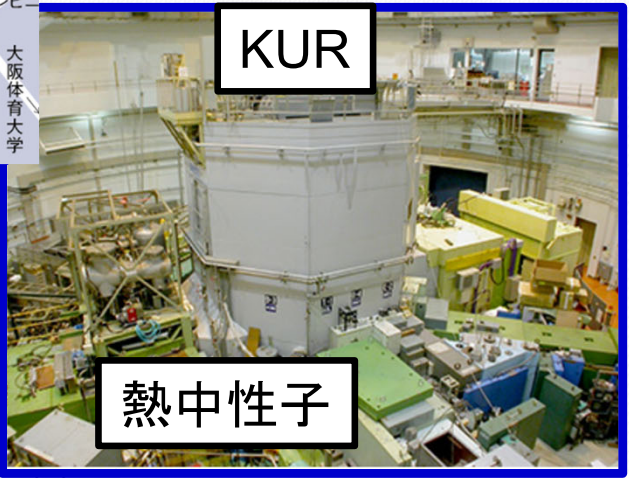
C-BENS

熱外中性子



FFA

陽子 ~ 150MeV



KUR

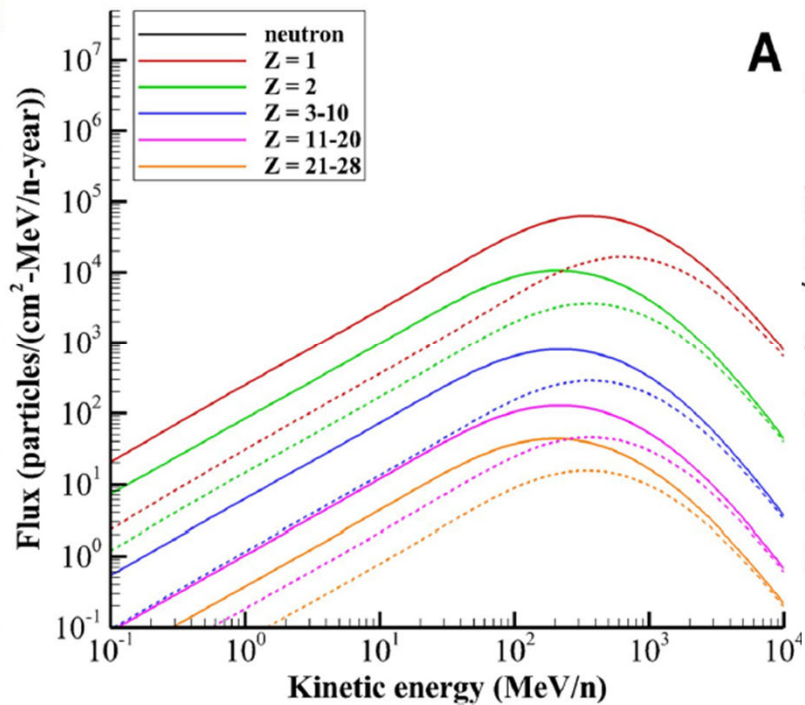
熱中性子



KUCA

熱中性子

宇宙船外



宇宙船内(アルミ壁20g/cm²)

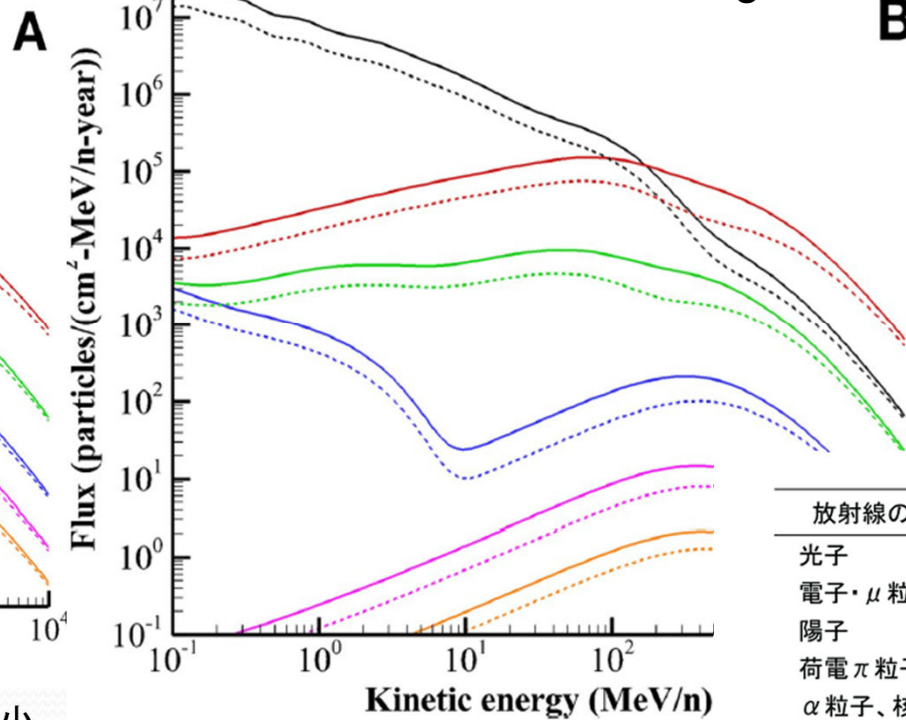


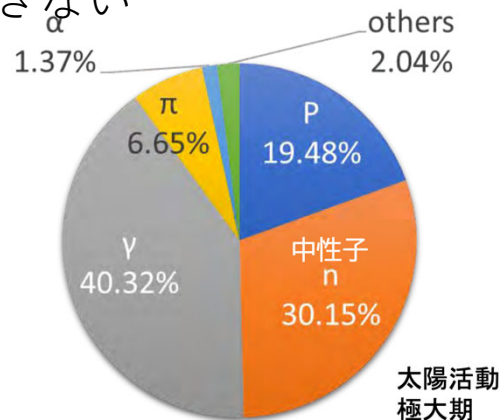
表1 放射線荷重係数 w_R

放射線の種類	1990年勧告	2007年勧告
光子	1	1
電子・ μ 粒子	1	1
陽子	5	2
荷電 π 粒子	-	2
α 粒子、核分裂片、重イオン	20	20
中性子	エネルギーに応じた値(図5)	

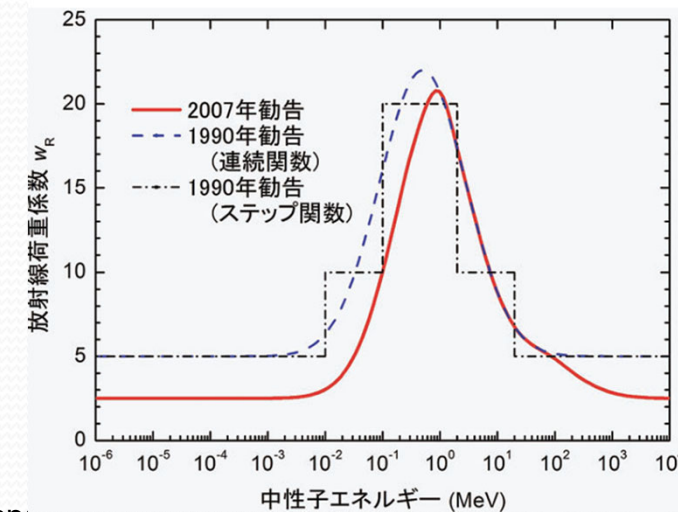
実線: 太陽活動最大、波線: 太陽活動最小

宇宙線の生物・機器への影響

- ・宇宙船内では、中性子の影響は無視できない
- 将来的に宇宙環境で生活?



太陽活動極大期



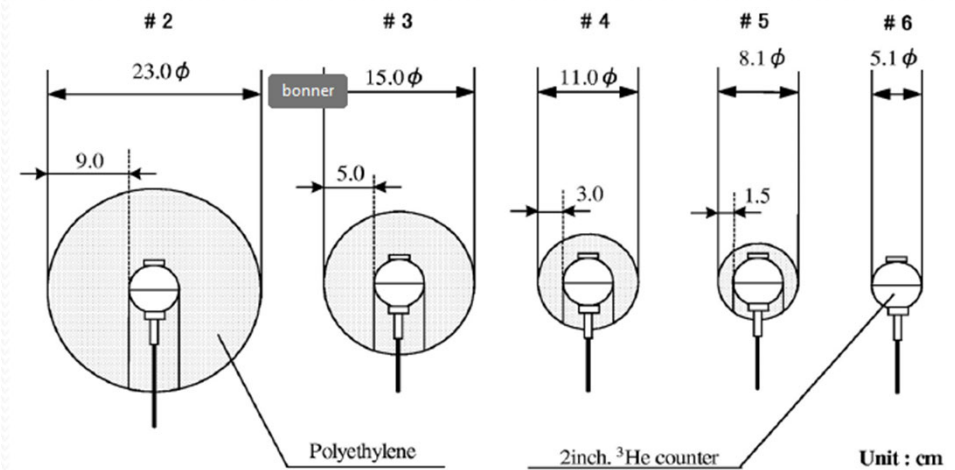
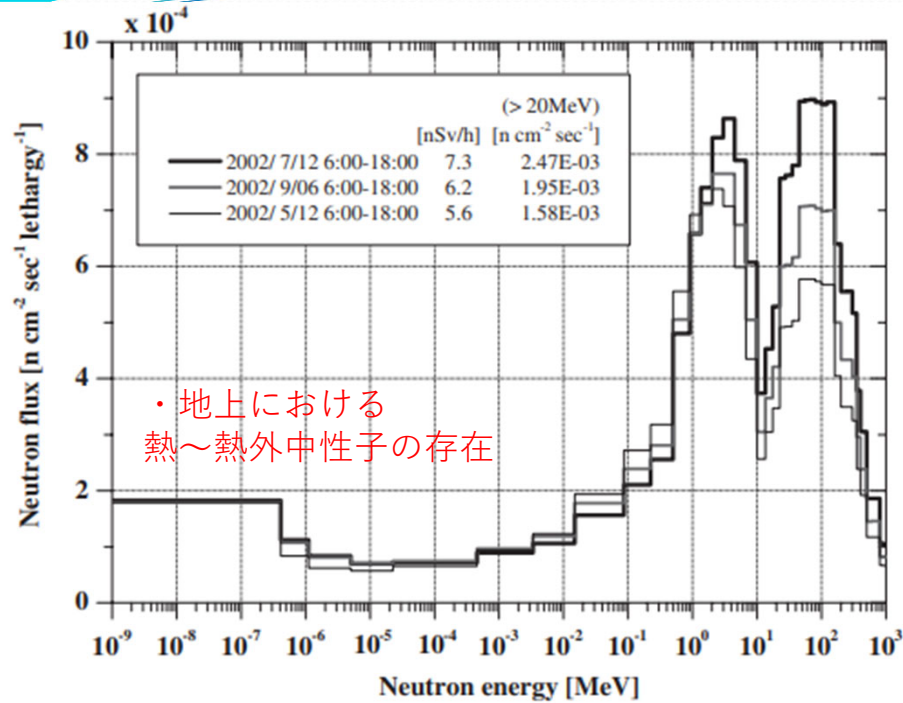
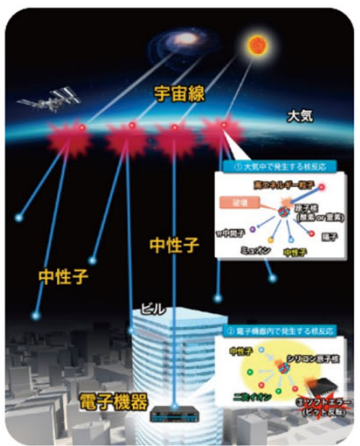


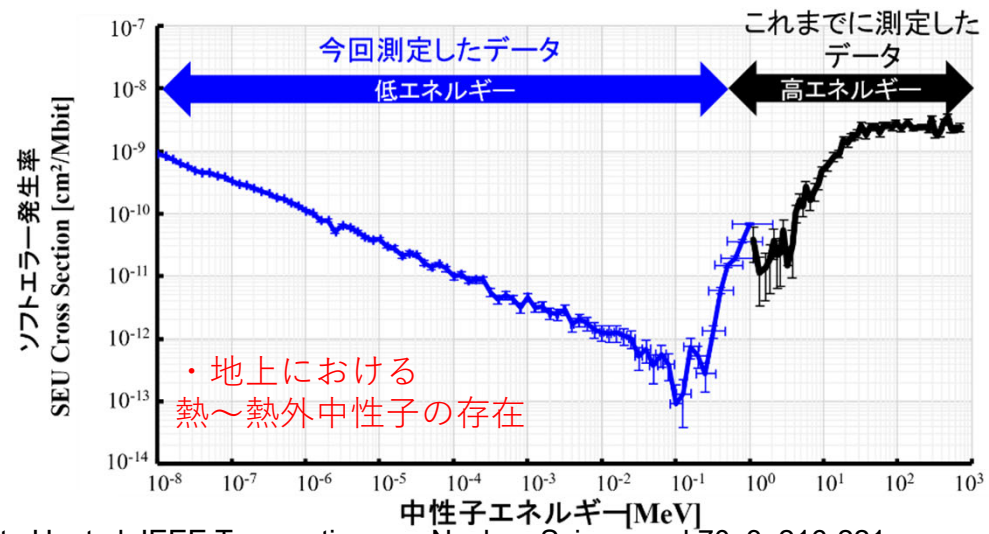
Fig. 5 Comparison of neutron energy spectra on three different days, July 12 (high flux), September 6 (medium flux) and May 12 (low flux) in 2002, measured by the Bonner ball (cited from Ref. 18))

T.Nakamura, et al, Sequential Measurements of Cosmic-Ray Neutron Spectrum and Dose Rate at Sea Level in Sendai, Japan, Journal of Nuclear Science and Technology, 42:10, 843-853,

宇宙線中性子測定の小屋
(東北大学川内キャンパス)



宇宙線起因中性子によるソフトエラー



Iwashita H, et al. IEEE Transactions on Nuclear Science vol 70, 3, 216-221.

宇宙線 x 中性子

国内の中性子照射場

研究用原子炉

- 京都大学複合原子力科学研究所 研究用原子炉 KUR 1MW or 5MW, 動物実験可 (2026年4月停止予定)
- 原子力研究開発機構 研究用原子炉 JRR-3 20MV, 動物実験×

加速器中性子源

- 京都大学複合原子力科学研究所 サイクロトロン 30MeV, 1mA(30kW), 動物実験可 (熱中性子, 0.5×10^9)
- 京都大学複合原子力科学研究所 電子線型加速器パルス中性子源 30MeV, 0.2mA(6kW), 動物実験△ 照射場構築要
- 青森県量子科学センター 20MeV, 0.1mA(2kW), 熱中性子 1.1×10^9 (n/cm²/s) (<0.5eV), 動物実験可
- J-PARC MLF物質生命科学実験施設, NOBORU, 動物× (中性子強度 <0.4eV 4.8×10^7 , 10MeV < 1.2×10^6)
ビームサイズ 10x10cm²
- 理研 RANS 7MeV 0.1mA(0.7kW)
- 大阪大学 核物理研究センター RCNP, 400MeV, 1.1 μ A(0.44kW)
- 北海道大学 HUNS (瞬間強力パルス状放射線発生装置研究室) 最大32MeV, 0.1mA(3.2kW)

医療用 (動物実験不可)

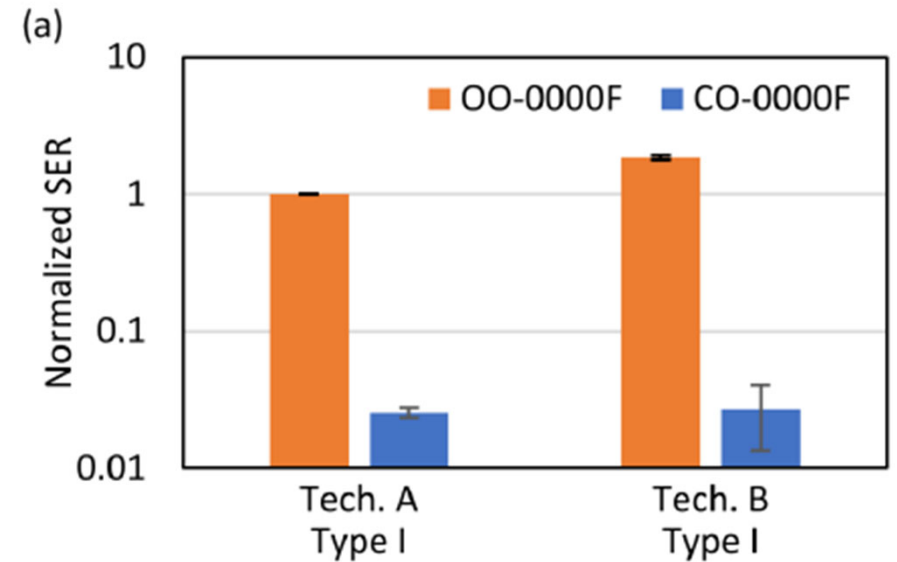
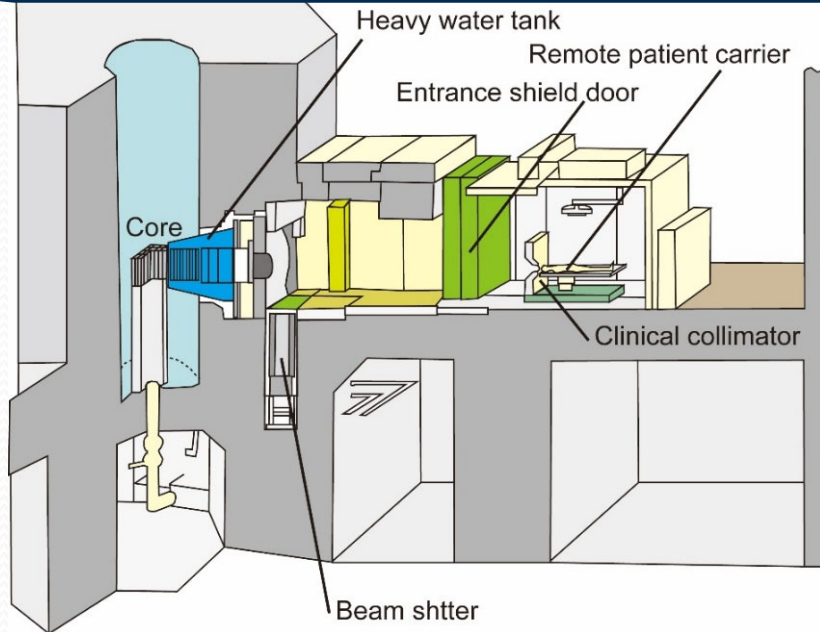
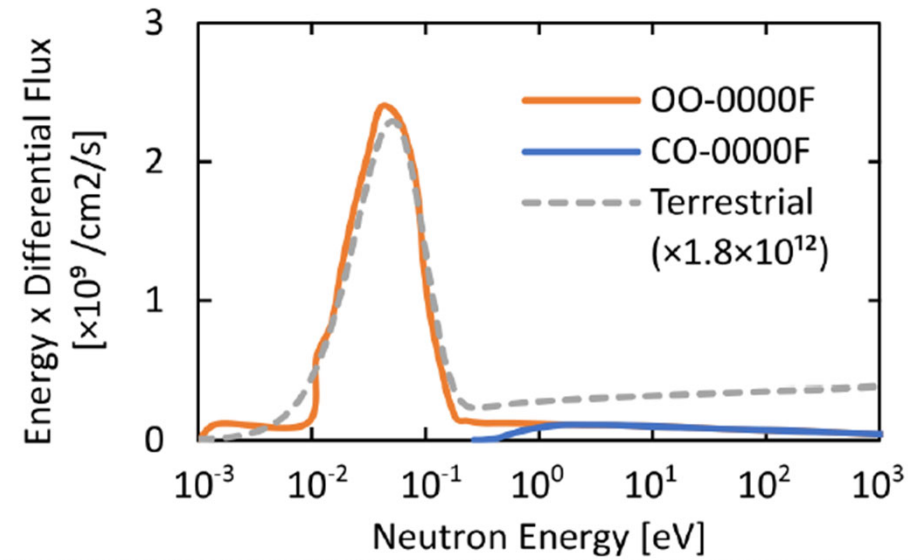
- 大阪医科大学・南東北病院, 上記加速器中性子源 サイクロトロン 30MeV, 1mA(30kW)
- 国立がんセンター・江戸川病院 リチウムターゲット、RFQ 2.5MeV, 10mA(25kW)
- つくばBNCT装置, 医療用のため開発 8MeV, 2mA(16kW)



宇宙線 x 中性子 京大複合研KUR照射場

ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)

正常細胞
がん細胞
熱中性子
α粒子
8 μm
5 μm
10B原子核
リチウム原子核

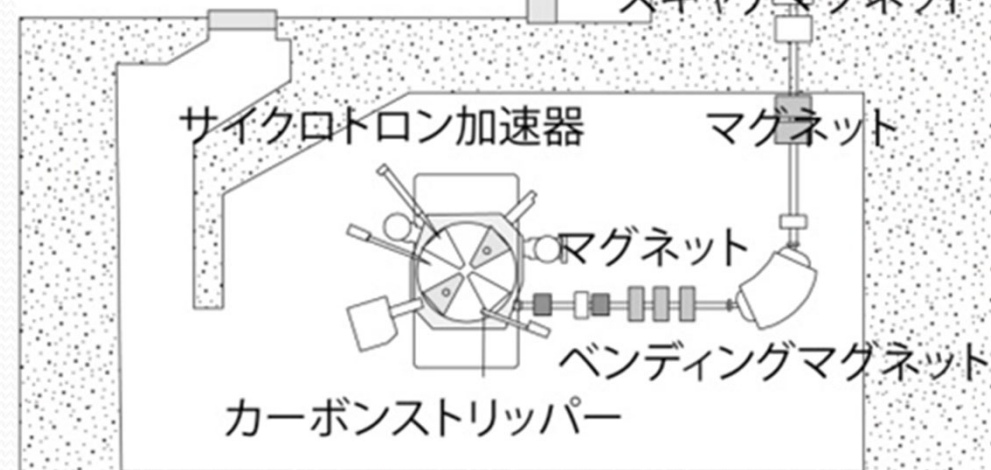
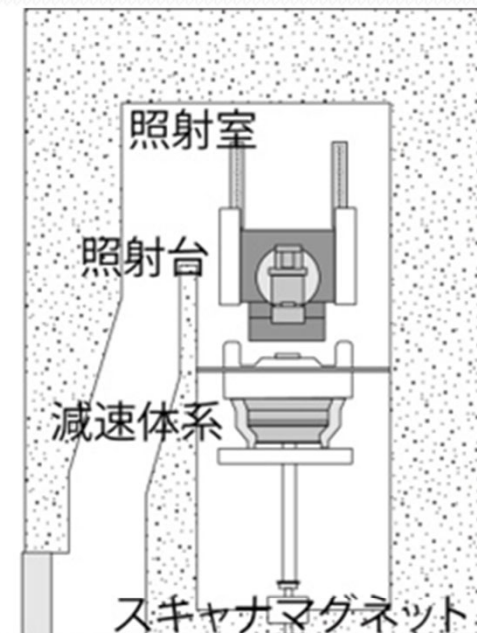
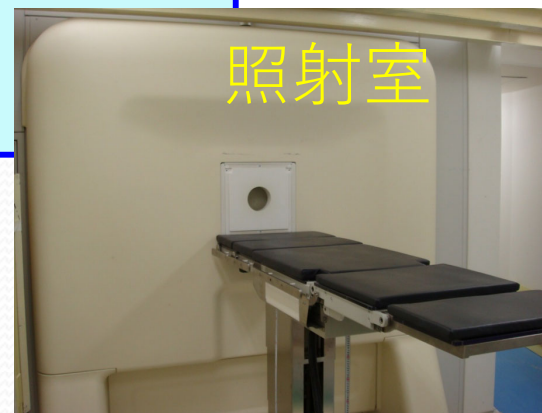
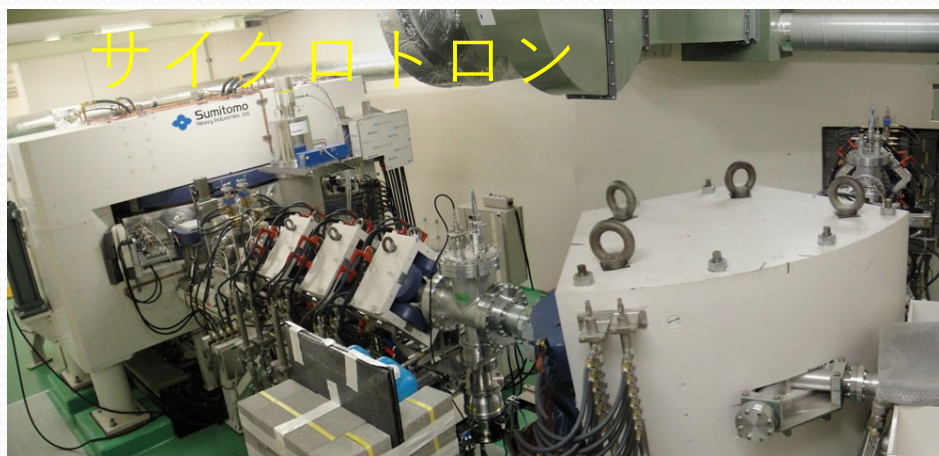


SRAM 半導体照射試験

京大複合研サイクロトロンベース中性子源

サイクロトロン(30MeV・1mA陽子ビーム)とベリリウムターゲットによる
加速器BNCTシステム (Cyclotron-Based Epithermal Neutron Source : C-BENS)

- ブリスタリングの克服
- 照射後に鉛遮蔽を設置し放射化による被ばく軽減
- 鉛・鉄・アルミ・フッ化物による
モデレーターの実現
- 医療機器として承認された世界で唯一の
加速器BNCTシステム



垂直入射イオン源
水素負イオン加速 30 MeV 1mA
RF frequency 73MHz
Average magnetic field 1.2T

京大複合研サイクロトロンベース中性子源

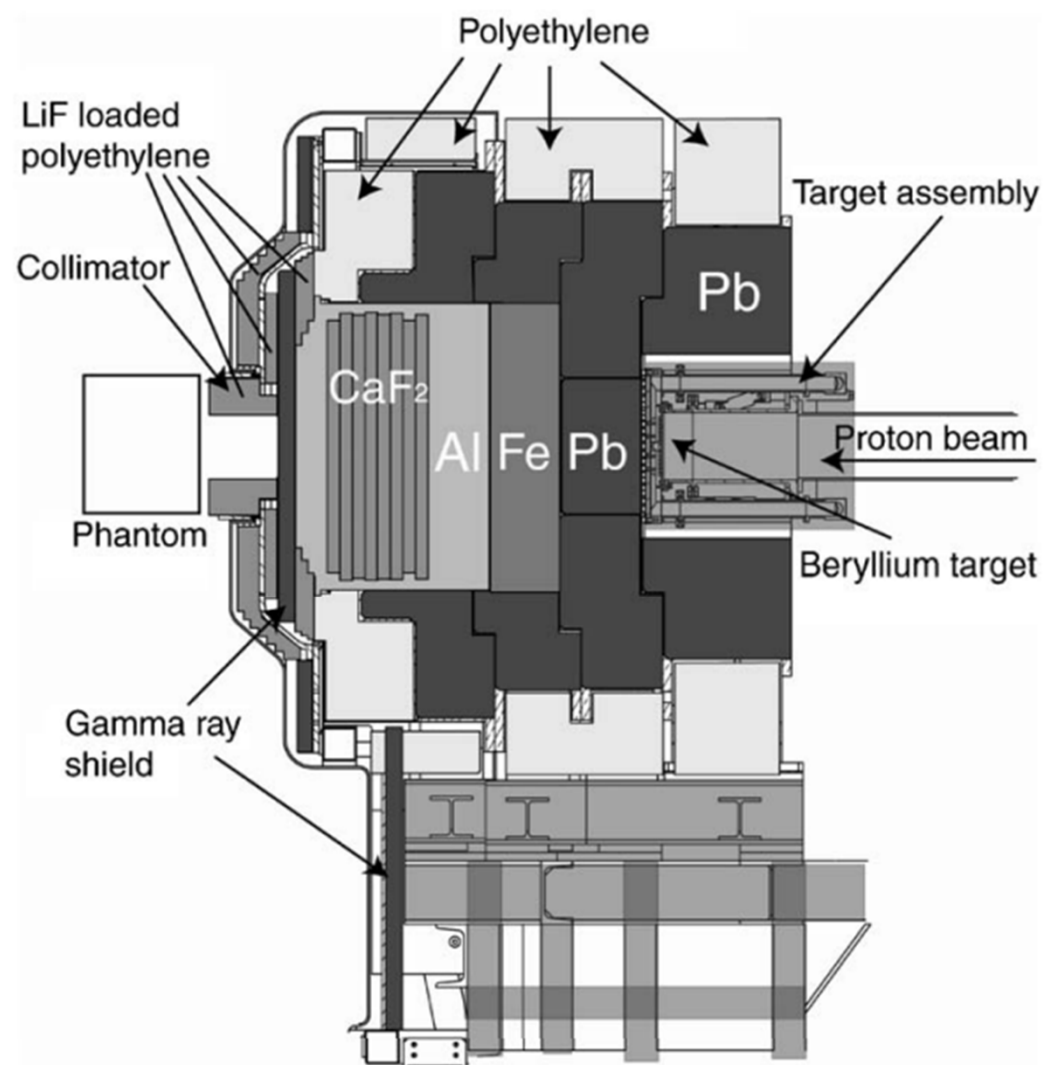
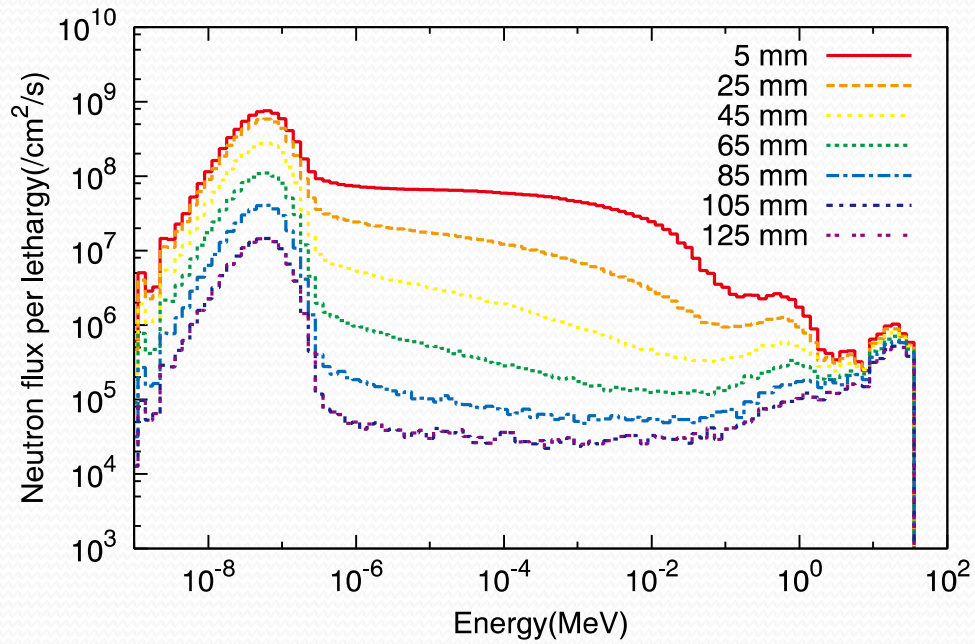
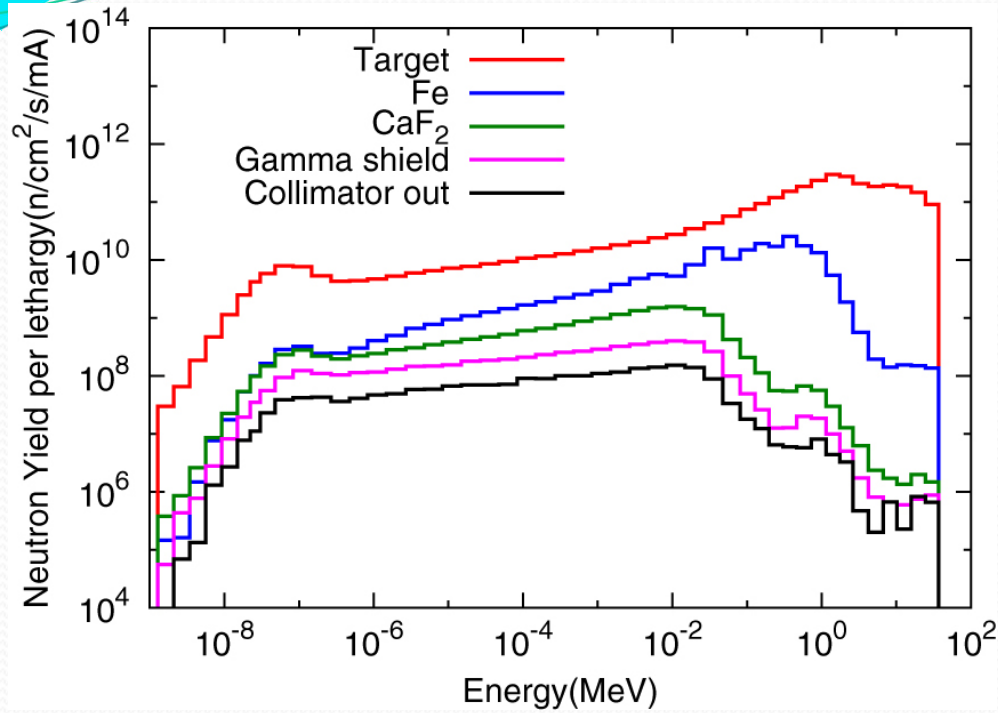
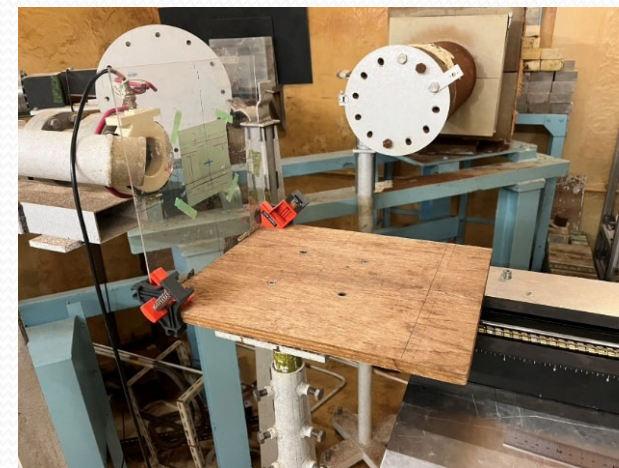


Fig. 1. Schematic layout of the BSA to obtain an epithermal neutron beam using a 30 MeV proton beam incident on a beryllium target.

京大複合研電子線型加速器中性子源



電子線型加速器

- 電子線照射_材料照射
- X線照射_RI製造
- コヒーレント放射光_物性研究
- 鉛減速スペクトロメータ
- 中性子TOF

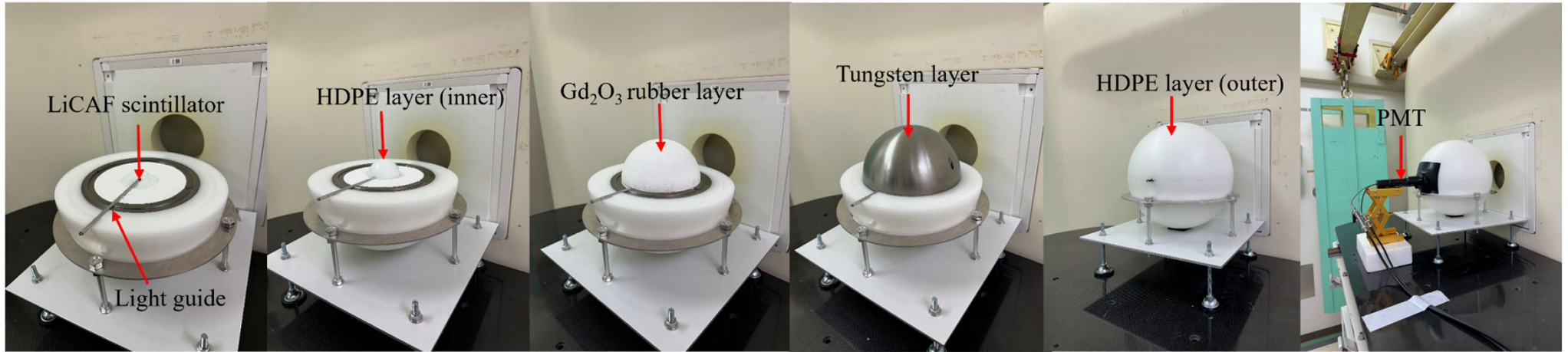
- 核燃料物質使用可能
- パルス中性子

12mライン $\sim 10^4$ (n/cm² s)

6kW出力時 $\sim 8 \times 10^{12}$ (n/s)

Taターゲット表面 $\sim 3 \times 10^{11}$ (n/cm² s)

宇宙線 x 中性子 中性子線量検出



(a)

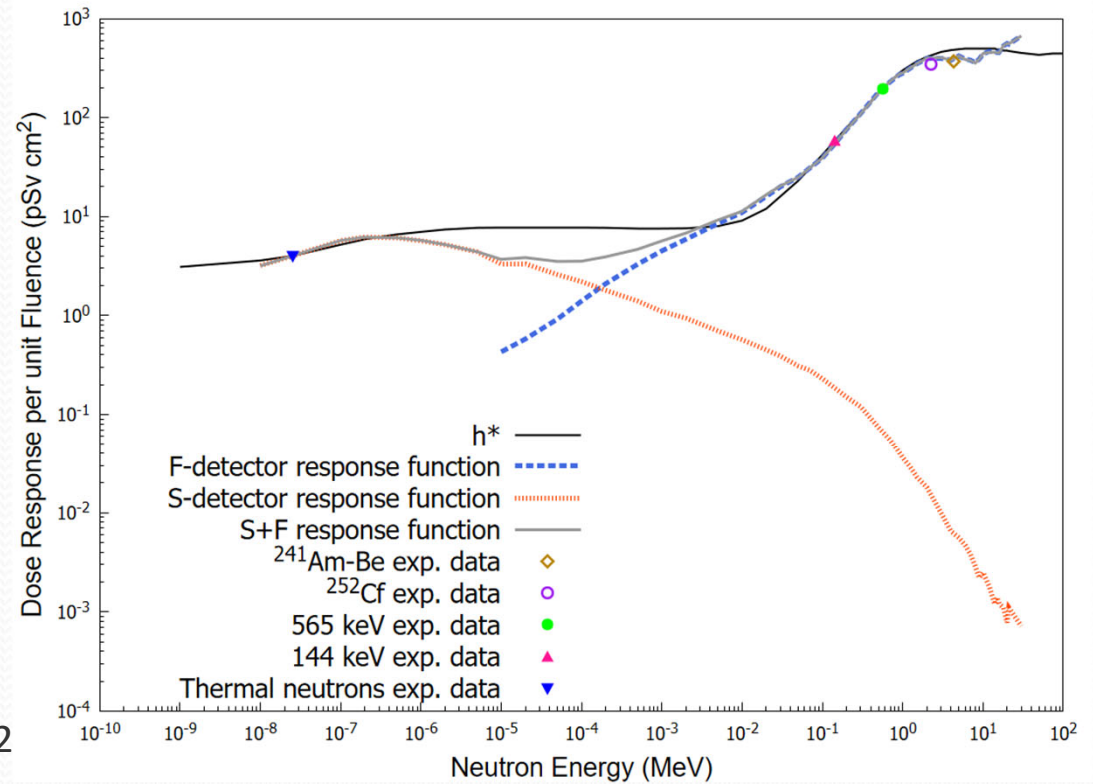
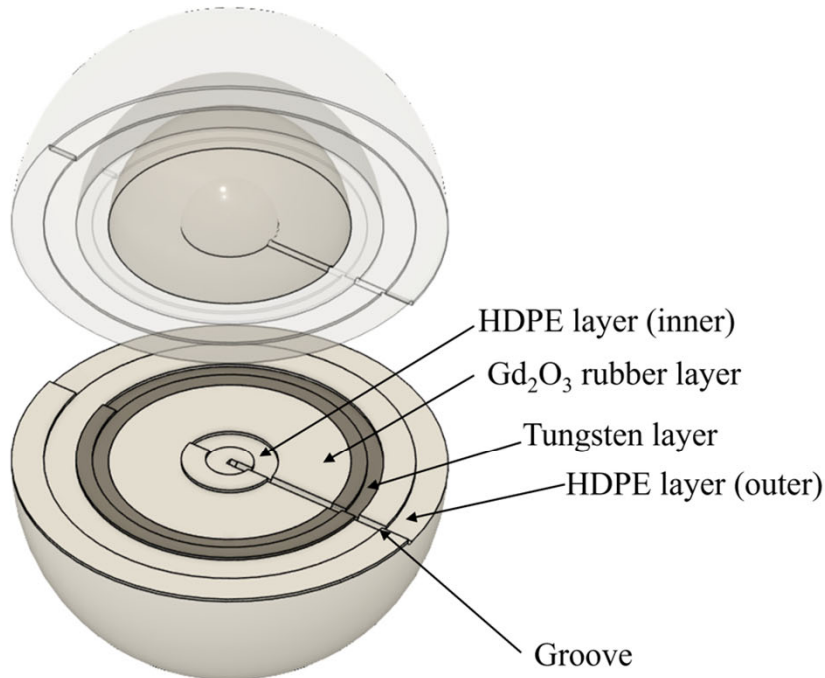
(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

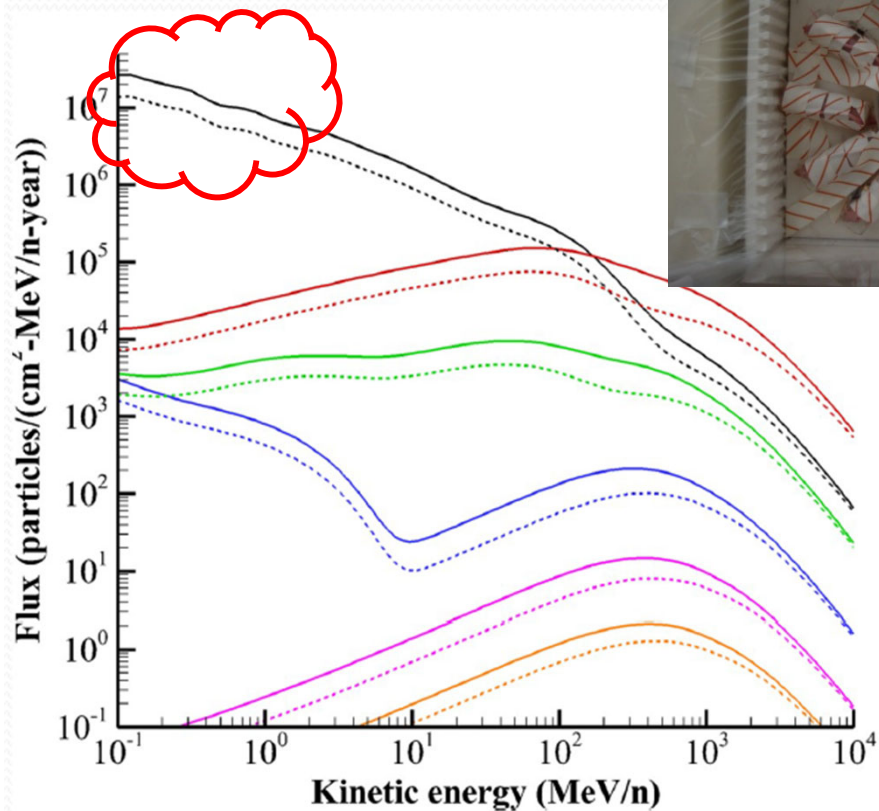
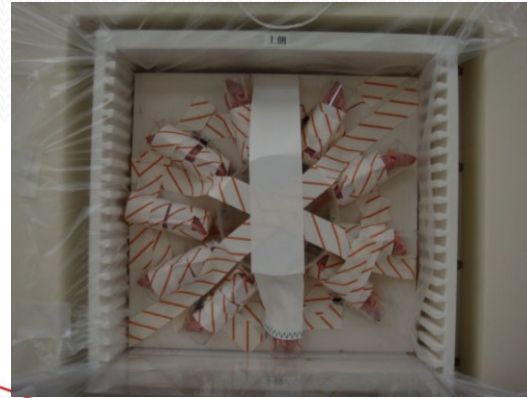


宇宙線 x 中性子 まとめ

宇宙線の生物・機器への影響

熱・熱外中性子、数MeV - 数十MeVまでの中性子照射場の整備

特に動物実験



宇宙線（中性子線）の線量測定可能な検出器の開発