

RCNPにおける飛行時間法を用いた 核破碎中性子エネルギースペクトル測定

岩元洋介

日本原子力研究開発機構

原子力基礎工学研究部門

-
- はじめに
 - 実験 ケース①:厚いターゲット(C,Al,Fe,Pb)からの中性子
ケース②:白色中性子照射場
ケース③:準単色中性子照射場
 - まとめ

はじめに

核破碎中性子の基礎データ(エネルギー・角度分布)は、加速器施設における放射線遮蔽設計の基礎データとして重要。



近年、J-PARC 中性子源、ADS、医用RI製造、半導体ソフトウェア試験(Single Event Effect: SEE)等への展開が議論される。



用途に応じて、核破碎中性子の基礎データが必要

PHITSコードの中性子生成に関する精度は？

目的

➤広いエネルギー範囲(数MeV～最大エネルギー)の中性子エネルギースペクトルを飛行時間法と液体有機シンチレータを用いて、測定。

➤PHITSコードの精度検証。

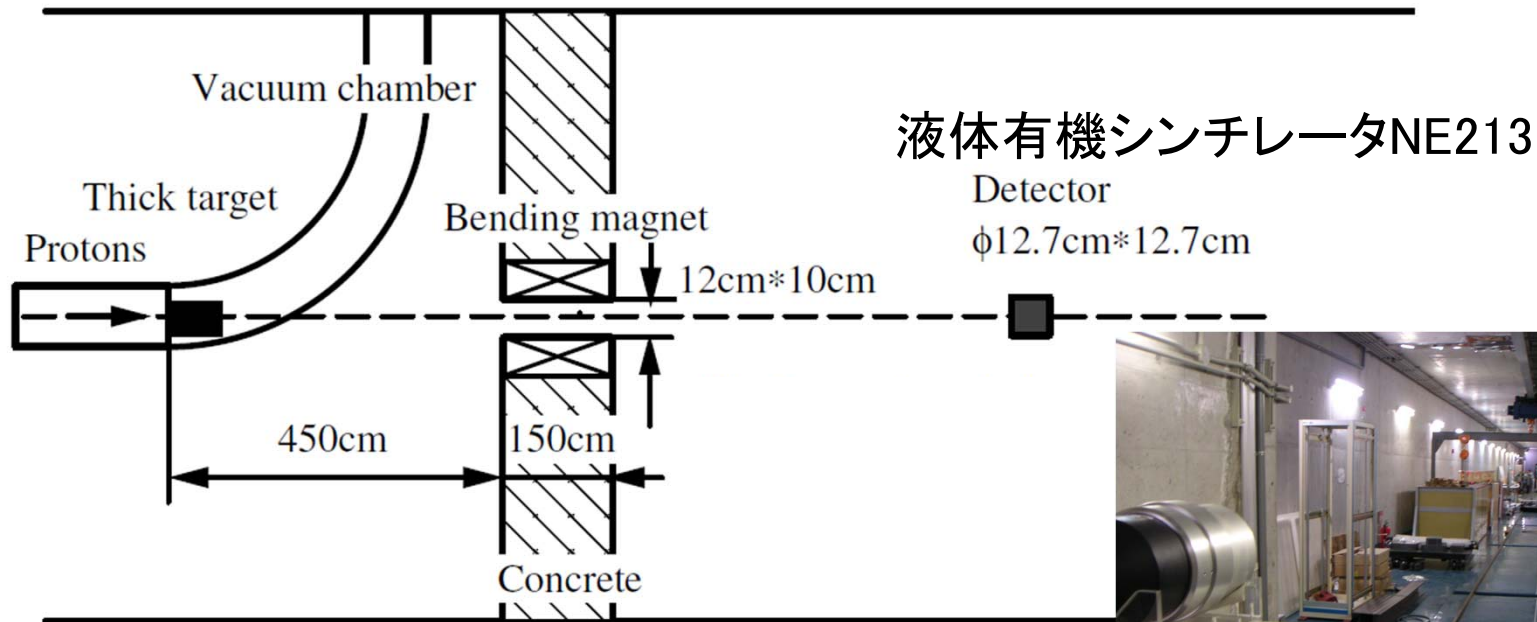
ケース	陽子エネルギー	ターゲット	測定角度	応用例
①	140, 246, 392	Full stop length C,Al,Fe,Pb	0, 90	遮蔽ベンチマーク
②	392	6.5cm t W	30	白色中性子場
③	140,200,246,392	1cm ⁷ Li	0, 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30	準単色中性子場

ケース① Nucl. Instr. and Meth. A593 (2008) 298 - 306.
Nuclear Technology 168 (2009) 340-344.

ケース② Nuclear Technology 173 (2011) 210-217 .

ケース③ Nucl. Instr. and Meth. A 629 (2011) 43 - 49.

ケース①: 実験体系



陽子エネルギー: 140, 250 and 350 MeV
角度: 0°, 90°
ビーム電流: ~20 nA、
ビーム間引き: 約500nsのビーム間隔
飛行距離: 11.4 m or 60 m (140MeV)
11.4 m or 67.8 m (250MeV)
11.4 m or 95 m (350MeV)

ケース①: ターゲット

厚さ(cm) / 飛程(cm)

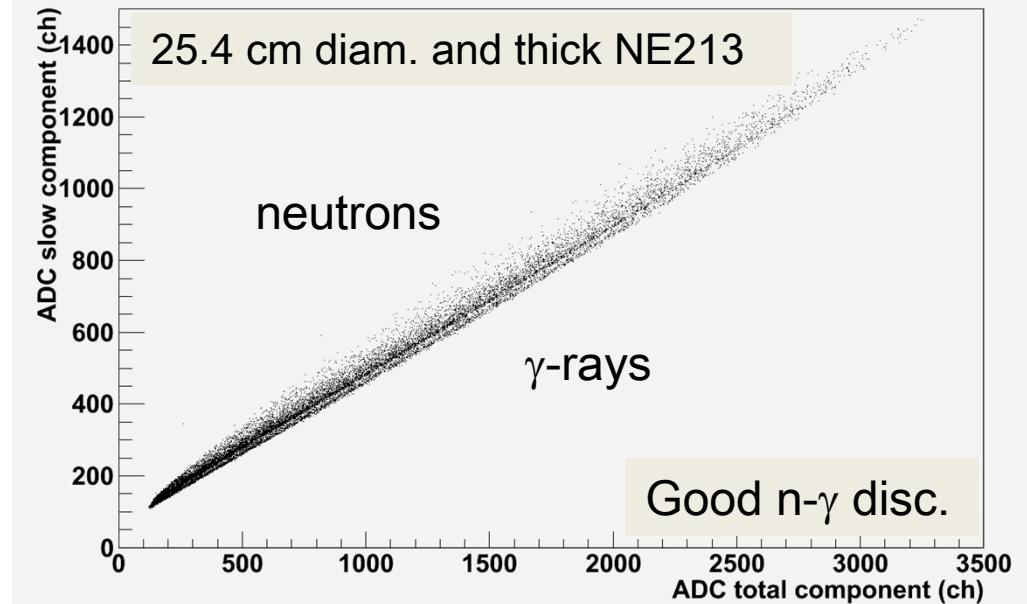
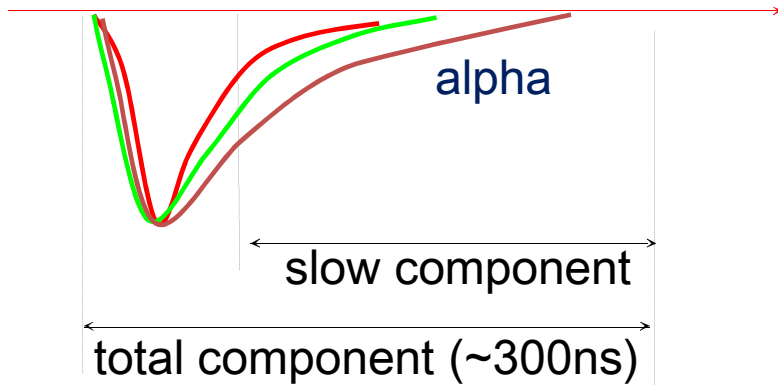
ターゲット	140 MeV	250 MeV	350 MeV
C	11.0 / 8.7	27.5 / 25.0	46.0 / 41.0
Al	8.5 / 6.7	20.0 / 18.0	34.5 / 31.0
Fe	3.5 / 2.6	7.5 / 6.9	13.5 / 12.0
Pb	3.5 / 2.6	7.5 / 6.8	12.5 / 12.0

ケース①: データ解析

● 中性子- γ 線波形弁別

Anode signal from NE213

electron *proton*

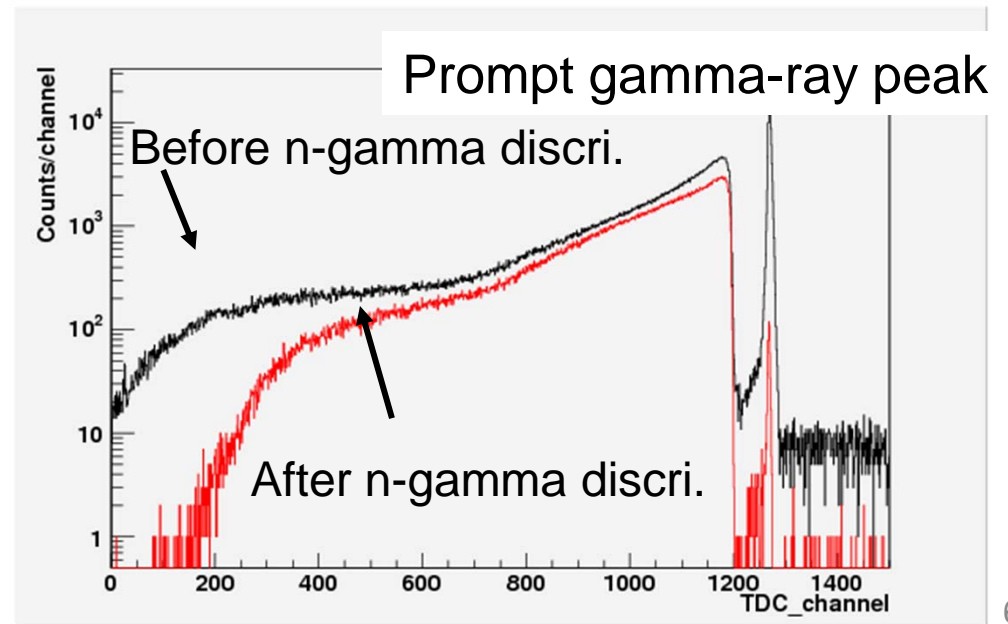


● TOF スペクトル

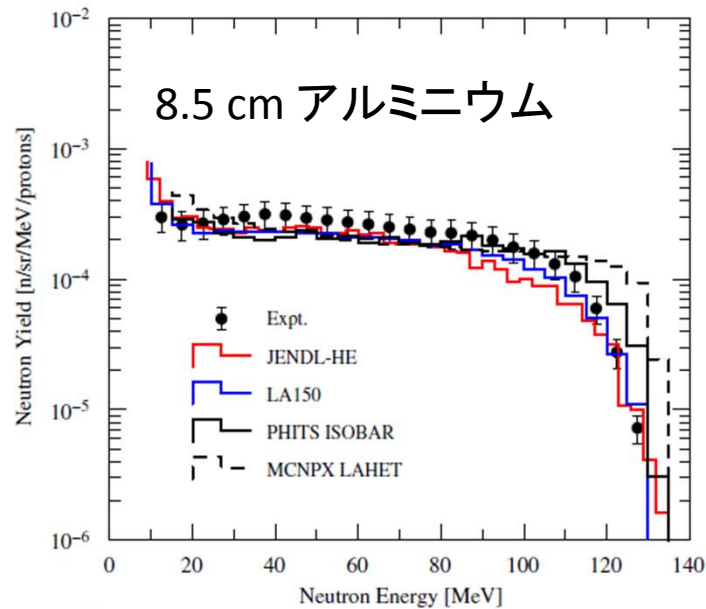
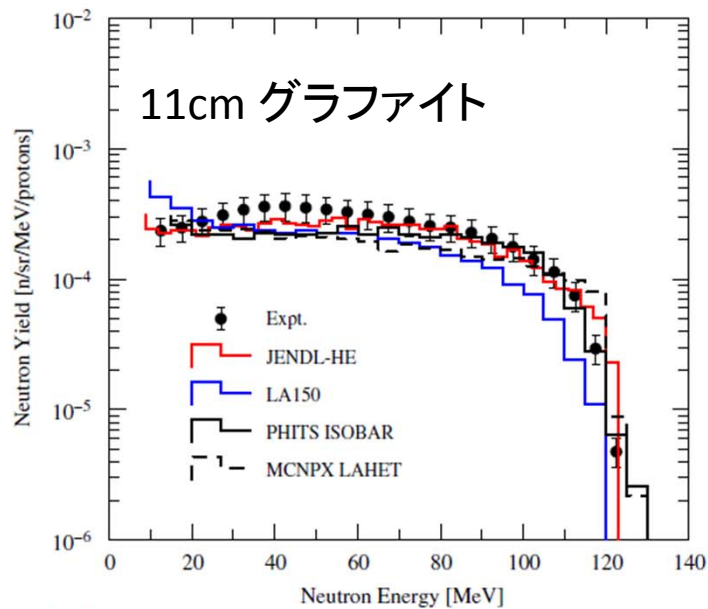
➤ 中性子エネルギー:
time(prompt γ -rays)-time(neutron)

➤ エネルギー分解能:

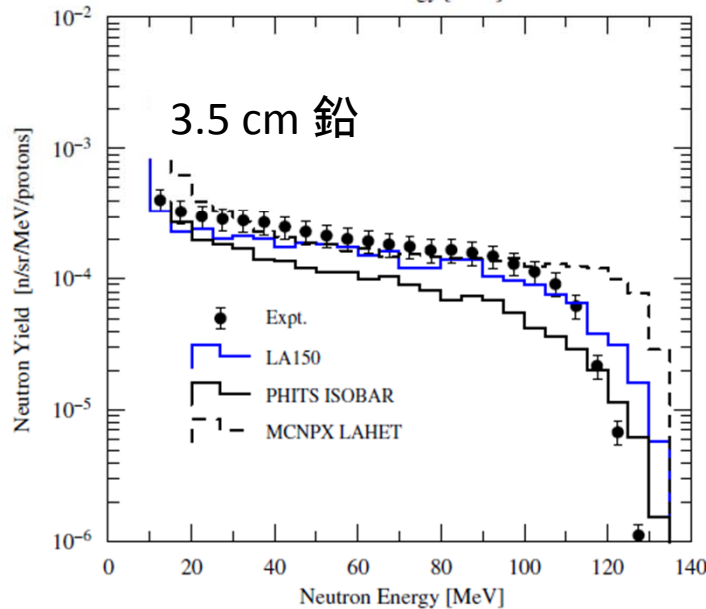
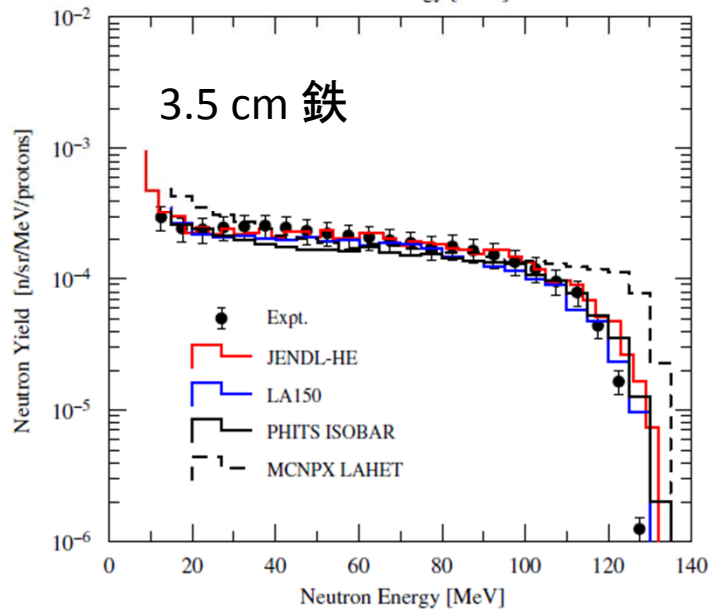
2.9 MeV for 380 MeV neutron at 95.5m.



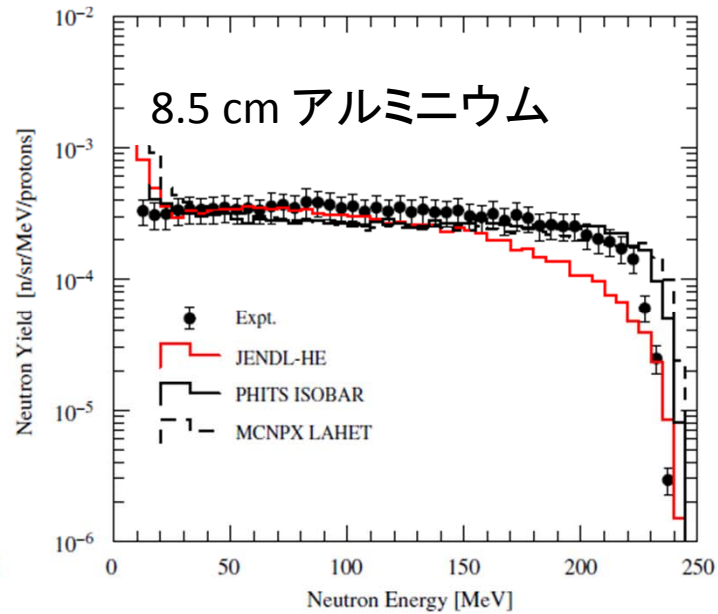
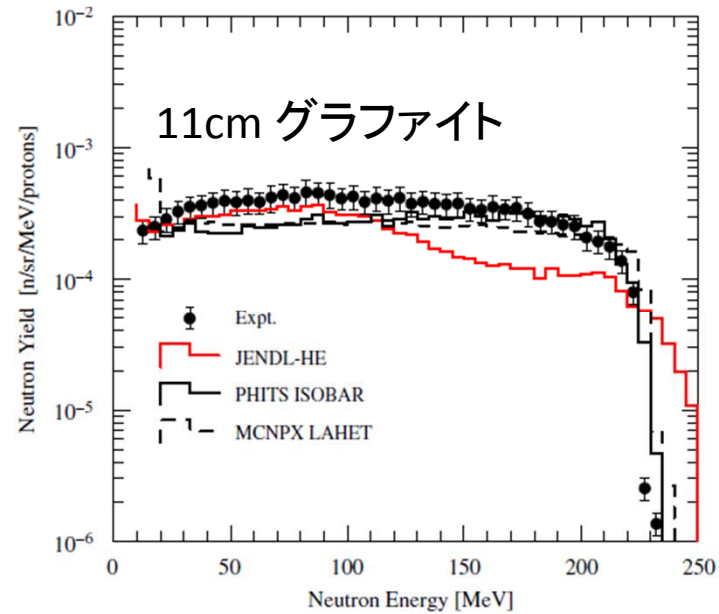
ケース①: 結果 140MeV



✓計算は概ね再現

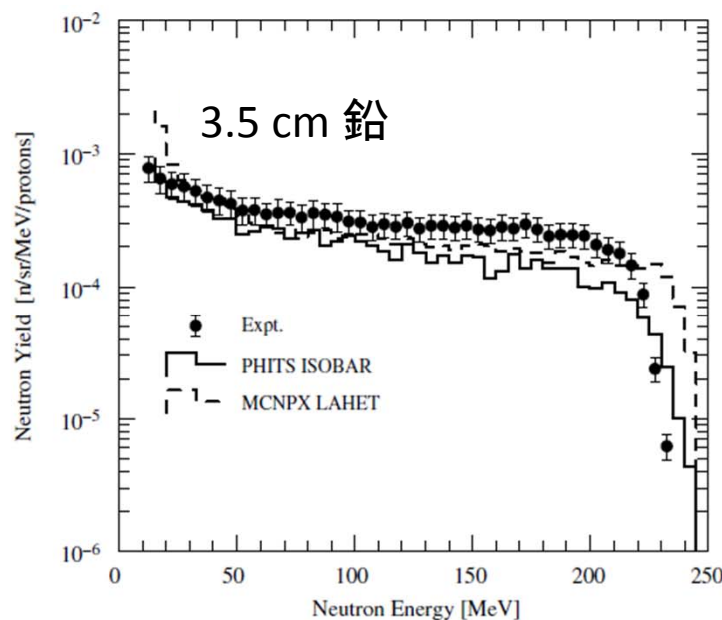
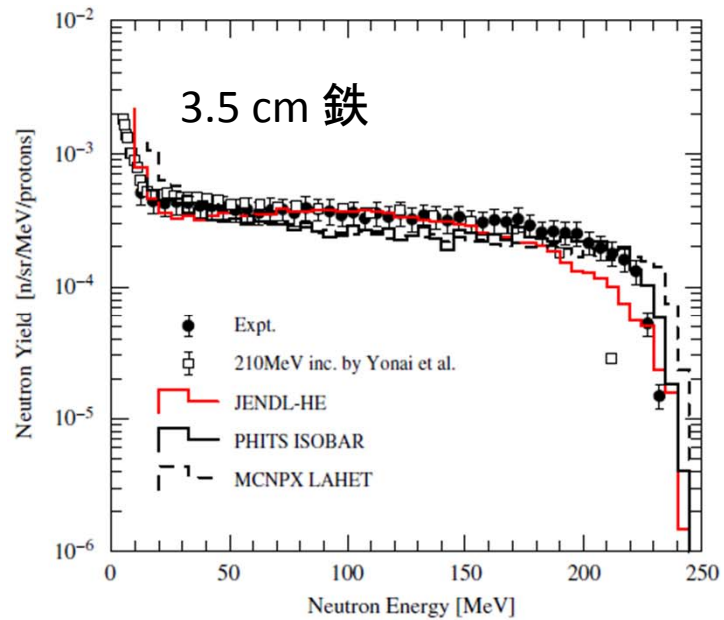


ケース①: 結果 250MeV

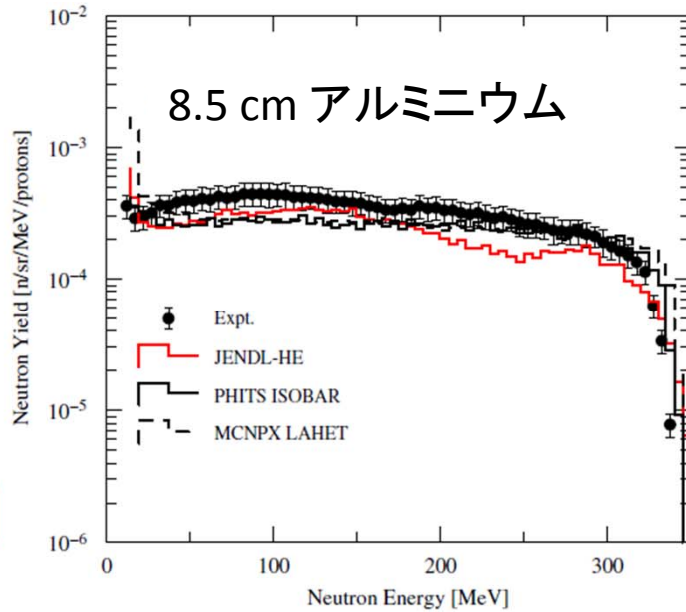
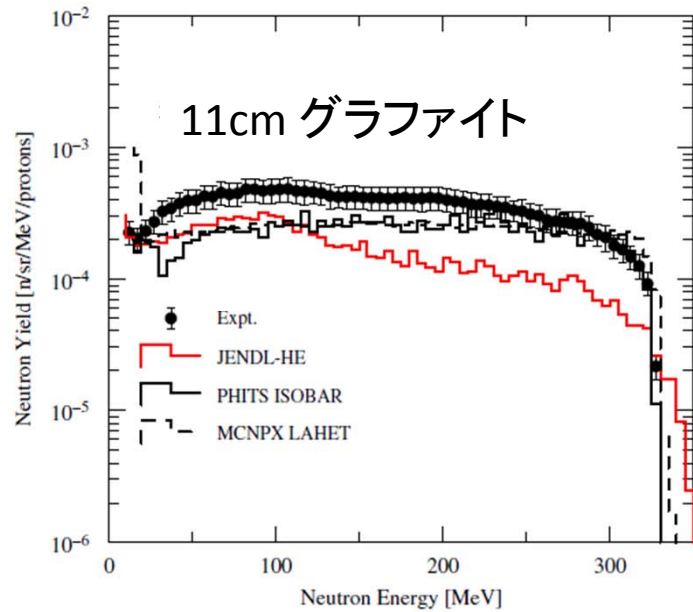


✓計算は概ね再現

✓軽核でJENDL-HEを用いた形状が不一致



ケース①: 結果 350MeV

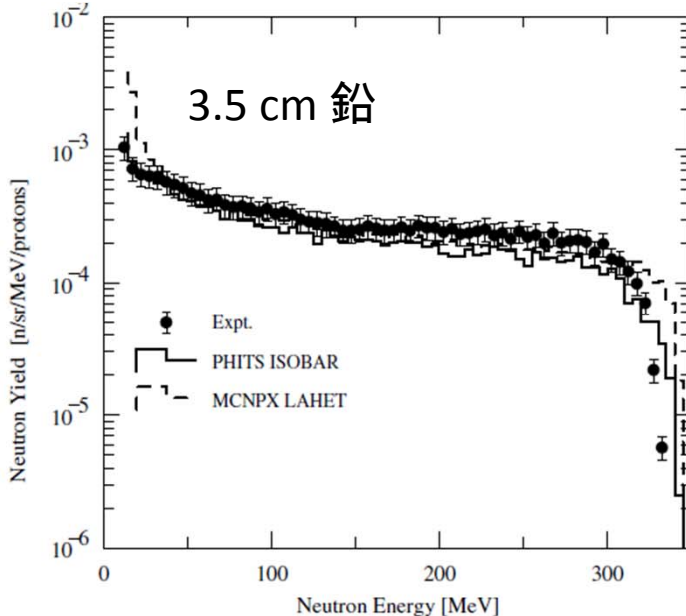
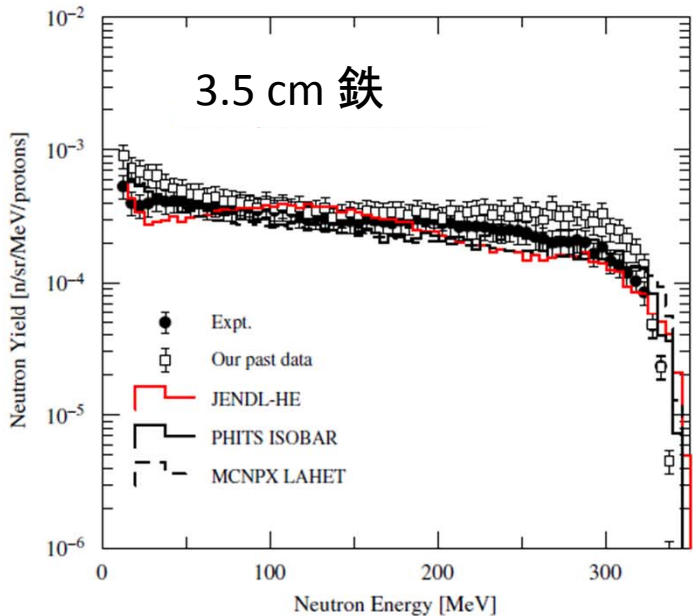


✓アルミ、鉄、鉛では良い一致

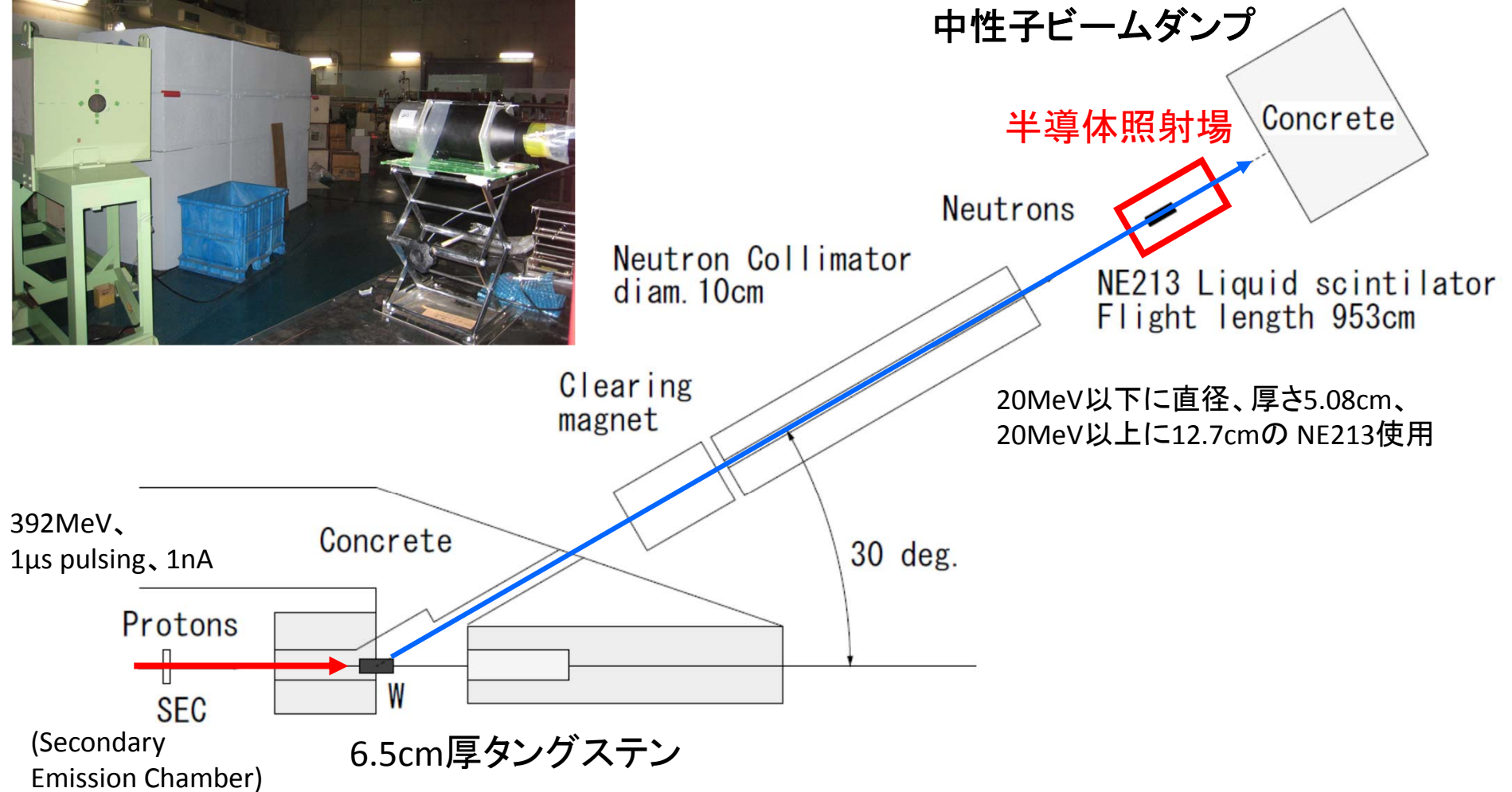
✓グラファイトで過小評価する傾向



✓多重散乱効果のない薄いターゲットでの比較が重要



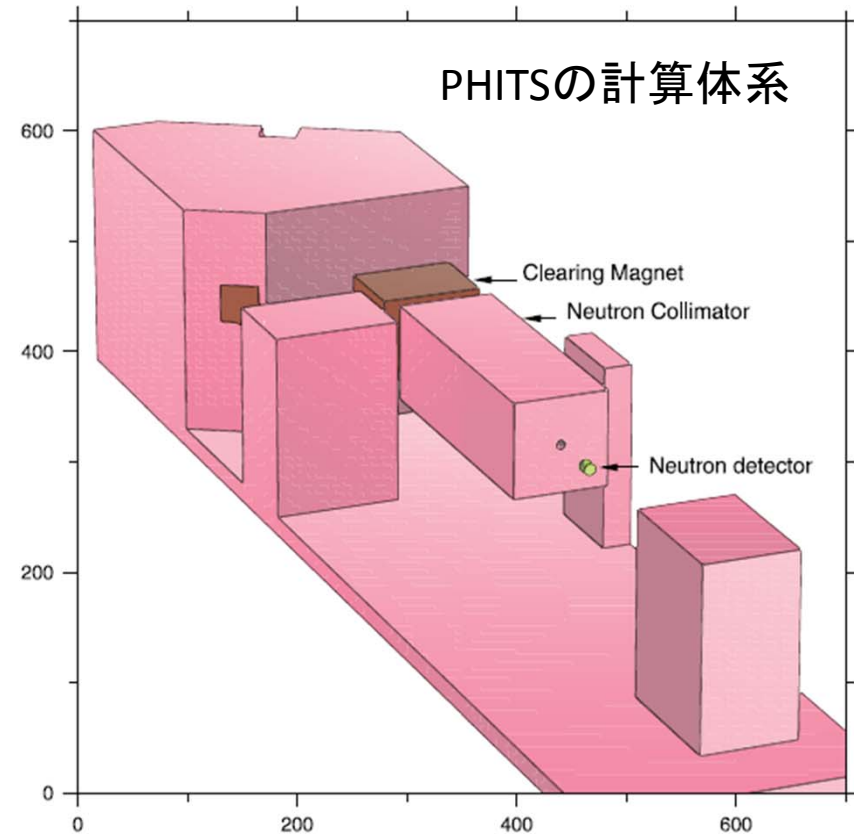
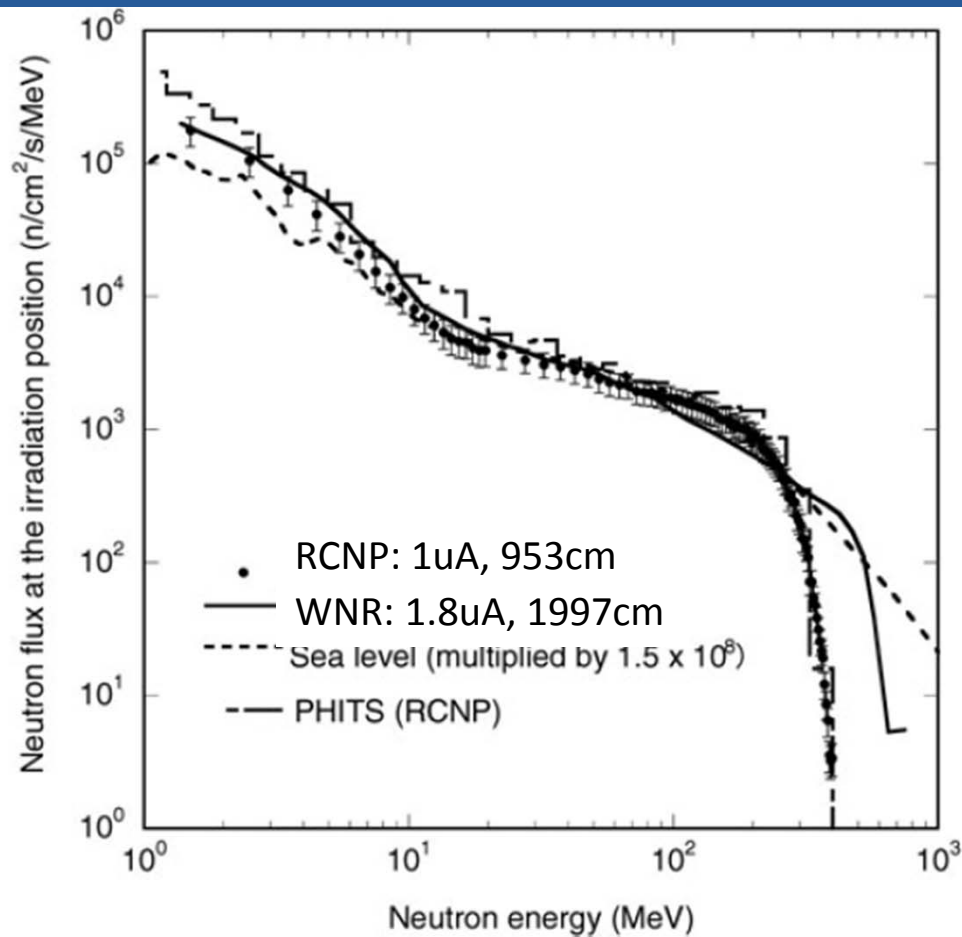
ケース②： 白色中性子照射場



- ・加速器チョッパーと検出器信号との飛行時間法により中性子エネルギー導出

ケース②: 白色中性子照射場

RCNP,WNR(米国ロスアラモス研究所),宇宙線起因の中性子フラックスの比較

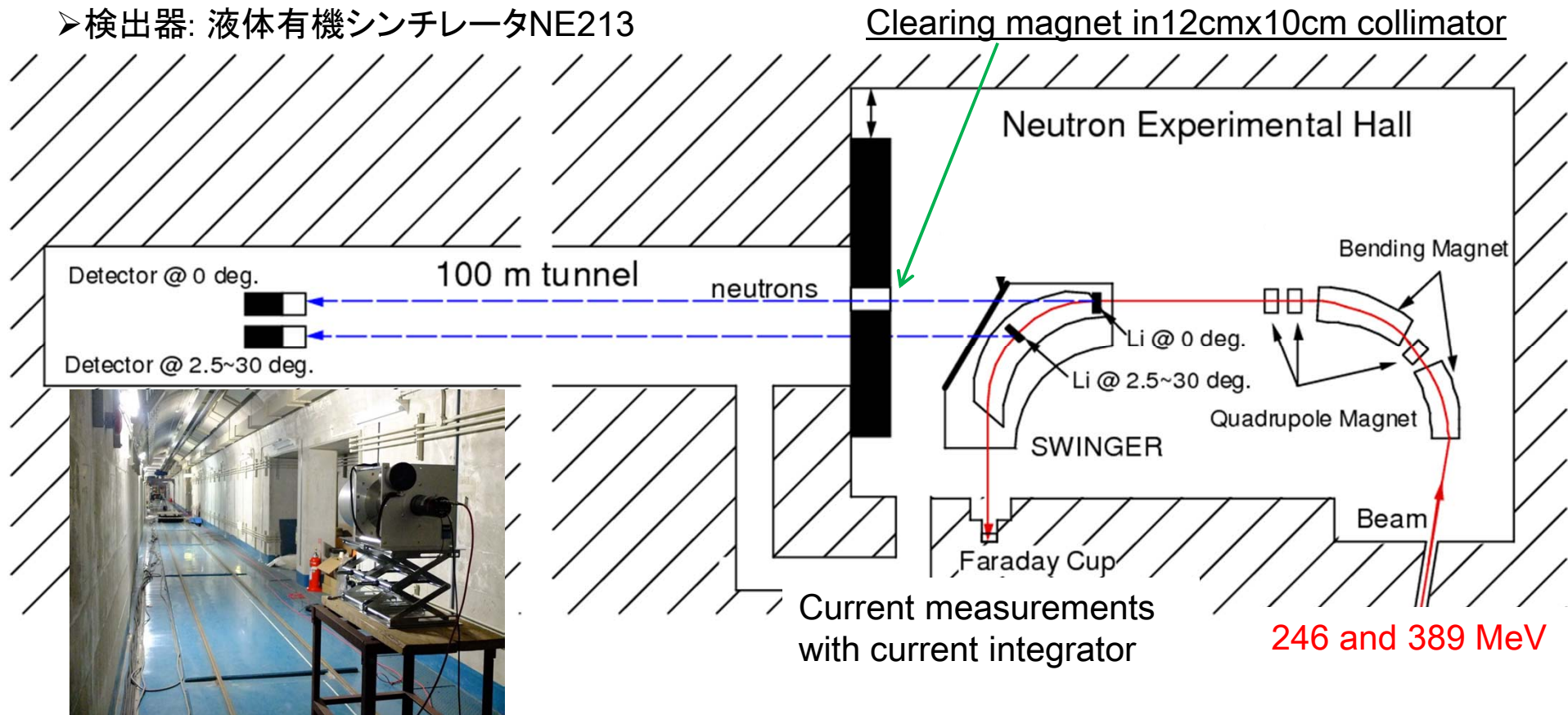


- PHITSは概ね中性子フラックスを再現
- RCNPとWNRの各照射位置における中性子強度は殆ど同じ
- 地表面の中性子エネルギースペクトル形状とRCNPの形状が300MeV以下で同じ

➡ SEEの加速試験に利用可能

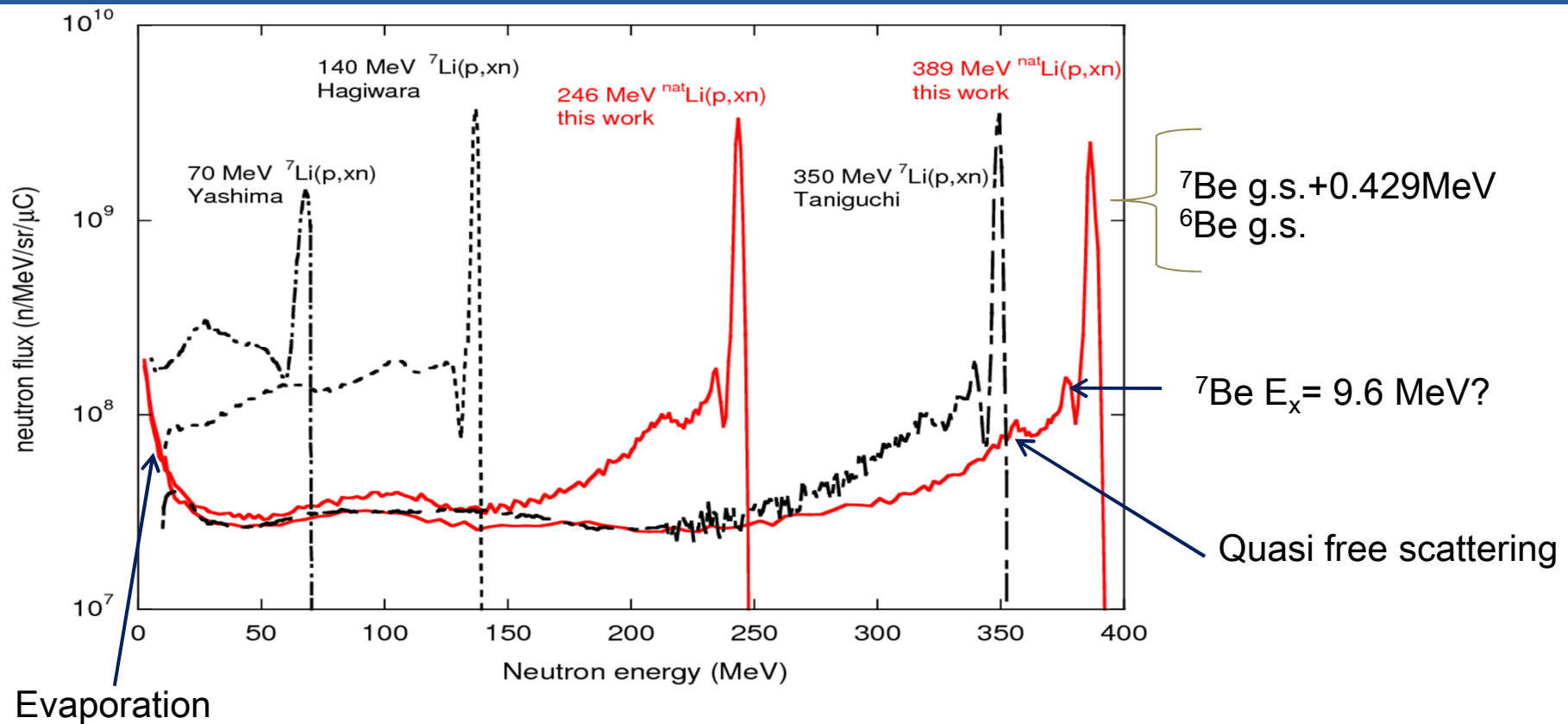
ケース③： 準単色中性子照射場

- ターゲット: 1cm thick natural Li (${}^6\text{Li}$ 7.6% and ${}^7\text{Li}$ 92.4%)
- エネルギー: Time-of-Flight (TOF) method
- 検出器: 液体有機シンチレータNE213



Detector thickness and diameter (cm)	Flight path (m)	Neutron energy range (MeV)	Emitted angle (degree)
5.08	6.4	2 - 10	0, (30)
12.7	15.5 (246 MeV), 17.3 (389 MeV)	10 - 100	0, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 30
25.4	60 (246 MeV), 95.5 (389 MeV)	100 -	0, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 30

ケース③: 0度の中性子エネルギースペクトル

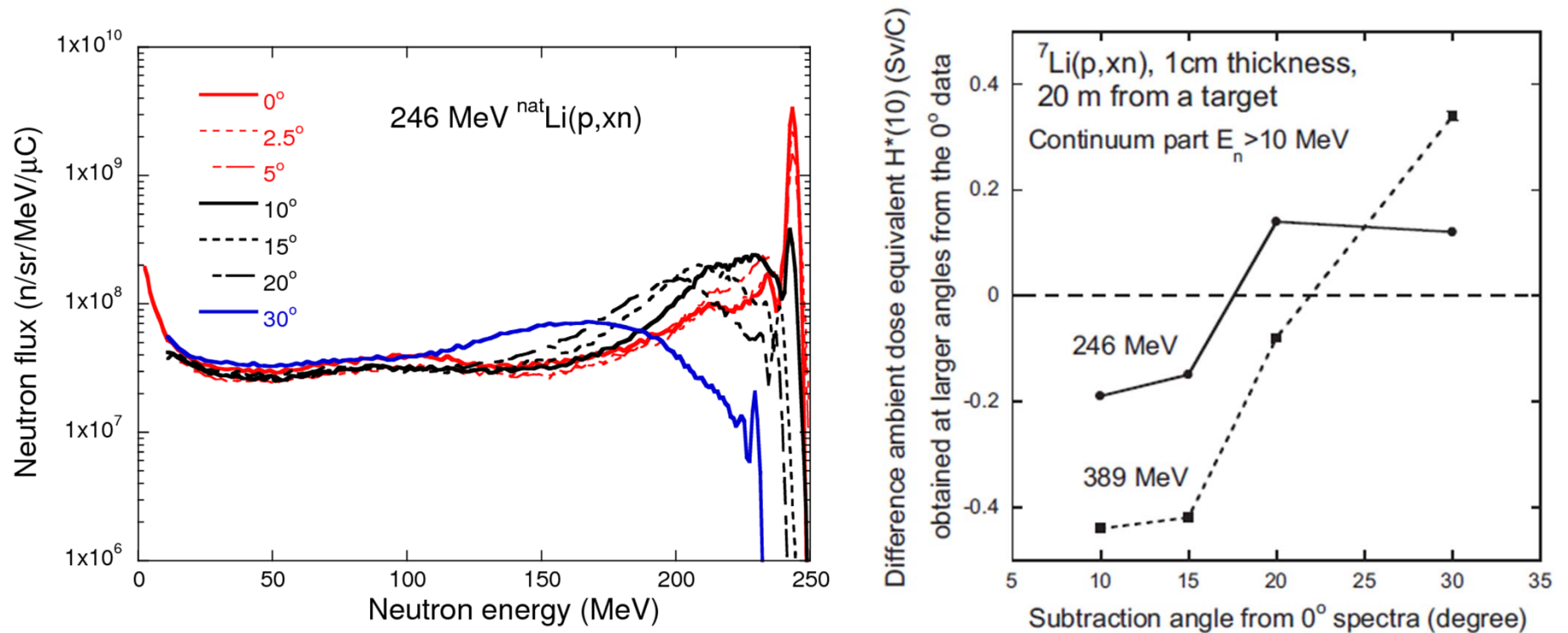


Proton energy [MeV]	140	246	352	389
Peak intensity (cross section) of ${}^7\text{Li}(p,n)$ [n/sr/μC]	1.04×10^{10} (35.8 mb)	$(1.11 \pm 0.17) \times 10^{10}$ $(38.2 \pm 5.9 \text{ mb})$	1.07×10^{10} (36.9 mb)	$(0.96 \pm 0.15) \times 10^{10}$ $(33.2 \pm 5.1 \text{ mb})$
$\phi_{\text{peak}}/\phi_{\text{total}} (10\text{MeV} < E_n)$	0.38	0.50	0.44	0.40

➤ $\phi_{\text{peak}}/\phi_{\text{total}}$ 比は、0.4 ~ 0.5.

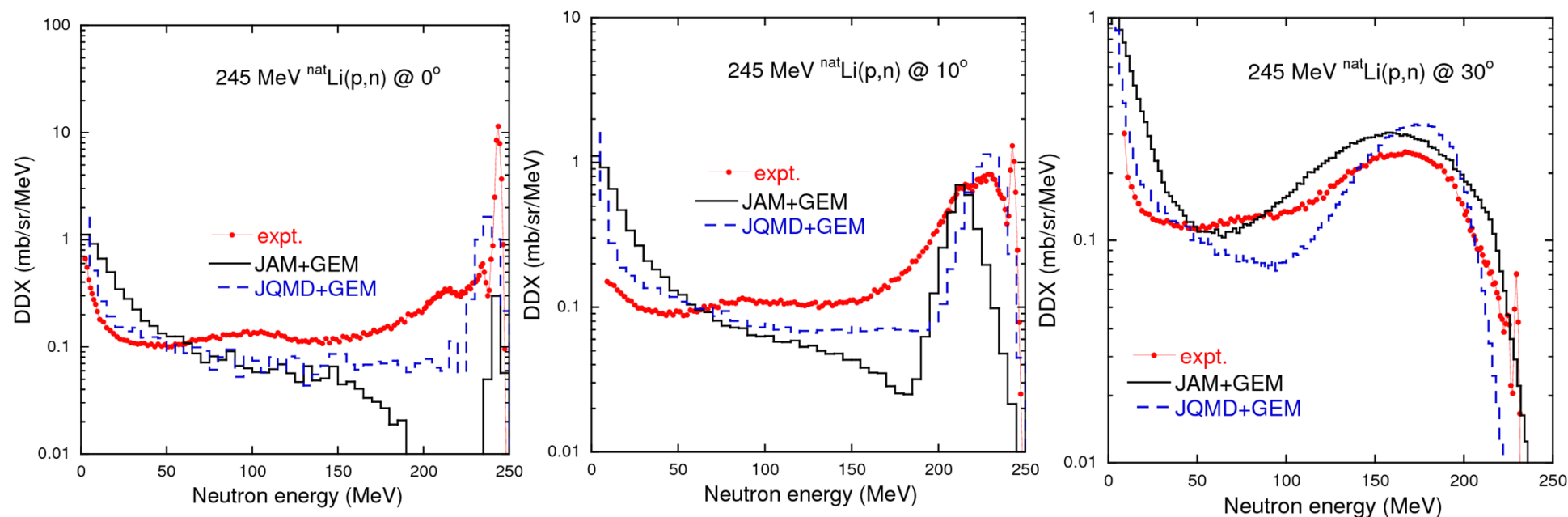
➤ ピーク中性子を用いた校正や断面積測定において、連続中性子の寄与が大きい

ケース③：準単色中性子を用いたモニター校正について



- ピーク中性子に対する応答を測るには、大角度の連続中性子に対する応答から差し引く
- 0度のスペクトルとの差し引きで、連続部が0に近いのは、18-20度の連続中性子スペクトルである。

ケース③：PHITSとの比較



➤ 0度と10度に関しては、PHITSは実験を全く再現できない。

➤ 準弾性散乱が考慮されていない、カスケードモデルはピーク構造に対応しない。



実験による断面積データをPHITSへ組み込む予定。

まとめ

- 140-400MeV陽子入射による核破砕中性子を、飛行時間法を用いて、広いエネルギー(数MeV~最大エネルギー)にわたって測定した。
- PHITSは厚いターゲットからの中性子生成を概ね再現する。
ただし、グラファイトに関しては過小評価の傾向がある。
- Liを用いた準単色中性子エネルギースペクトルは、PHITSのカスケードモデルでは十分に再現できないので、測定データをソース項としてPHITSへ組み込む予定。