

PHITSを用いた重陽子入射Li標的 における中性子生成の計算

高度情報科学技術研究機構
古立直也

● PHITSを用いた重陽子入射Li標的における中性子生成の計算

➤ 1A重陽子線形加速器

- ✓ 中速部40MeV重陽子ビーム中性子源
 - 核融合炉材料照射試験
- ✓ 高速部400MeV重陽子ビーム中性子源
 - トリチウム生成

➤ PHITSを用いた重陽子ビーム+Li標的シミュレーション

- ✓ 400MeV重陽子による生成中性子情報の取得
- ✓ 生成中性子によるトリチウム生成数の概算

PHITS：任意の形状・物質内における多様な放射線の挙動を解析可能な汎用モンテカルロ計算コード

T. Sato et al., J. Nucl. Sci. Technol. 61, 127-135 (2024)

- ✓ 重陽子の1次反応に関する物理モデル
 - 阻止能モデル：ATIMA
 - 重陽子全反応断面積モデル：MWO
 - 核反応モデル：
 - INCL(核内カスケードモデル)+GEM(蒸発モデル)

✓ PHITSで使用する物理モデル及びライブラリ

	中性子	陽子	原子核	μ粒子	電子	光子
	1 TeV	1 TeV/n	1 TeV/n	1 TeV		1 TeV
↑	JAM + GEM 3.0 GeV	JAMQMD + GEM	JAMQMD + GEM	JAM/JQMD + GEM	EGS5, ETS or ETSART	JAM/JQMD + GEM + JENDL + NRF
200 MeV	INCL4.6 + GEM	t 3He α JQMD + GEM	JQMD + GEM	200 MeV		EPDL97 or EGS5
20 MeV	JENDL-5	d 10 MeV/n	ATIMA or KURBUC / ITSART	ATIMA + Original Model	1 keV	1 keV
↓	JENDL-4 or JENDL-5	1 MeV	1 keV	1 keV	1 keV	1 keV
低	0.01 meV	*負ミューオンのみ(捕獲反応)		*JQMD + GEM	ETS or ETSART 1 meV	

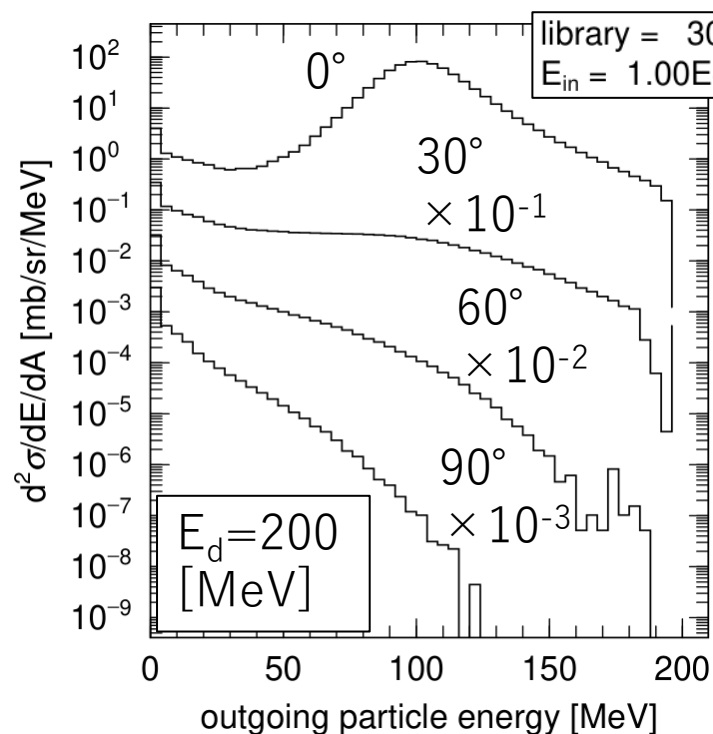
赤: 原子核反応モデルもしくはライブラリ 青: 原子反応モデルもしくはライブラリ
 灰色でハイライトしたモデルやライブラリは、初期設定では利用されない

(PHITS3.34 pdf資料、
<https://phits.jaea.go.jp/image/phits334-upgrade-jp.pdf>)

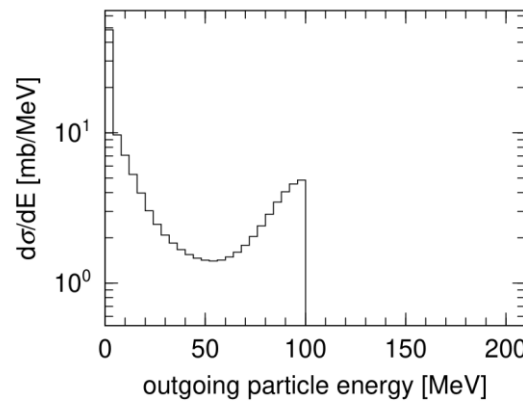
● JENDL-5重陽子サブライブラリの利用

- ✓ PHITSでは、重陽子の核反応シミュレーションに評価済み核データライブラリを使用可能
- ✓ JENDL-5重陽子サブライブラリは中性子放出の2重微分断面積実験値を良く再現する精度の高い評価手法を使用しているが、上限200MeVのため400MeVの計算には使用できない
- ✓ 200MeVまでのライブラリを使用した計算とPHITSモデルを使用した計算を比較し、計算精度の検証に利用

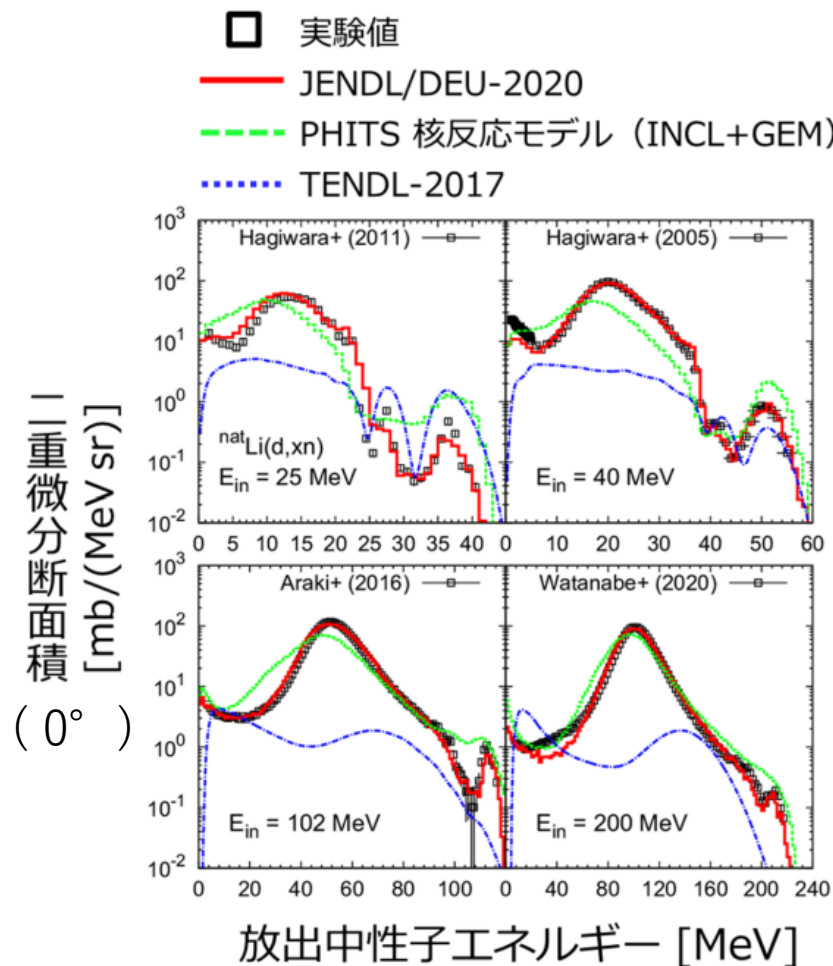
ライブラリ断面積出力モードで出力した
d+⁷Li中性子放出の2重微分断面積



PHITS3.34以前で重陽子ライブラリを使用した際に
100MeV以上中性子が放出
されないバグあり

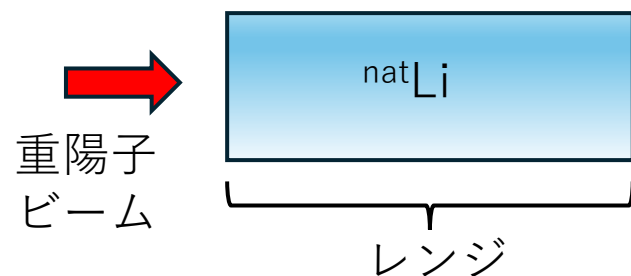


中山梓介、
核データニュース No.133(2022)



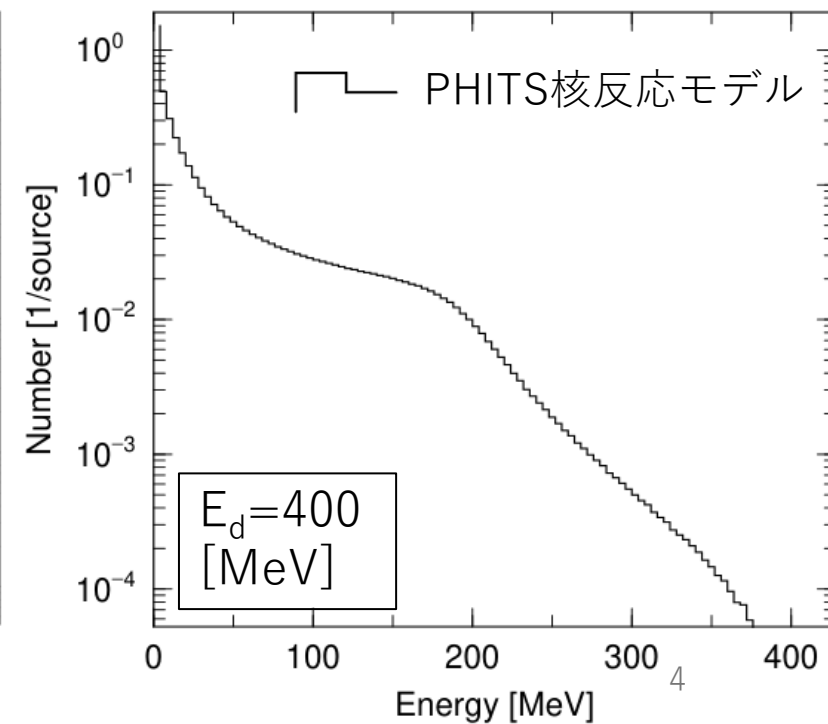
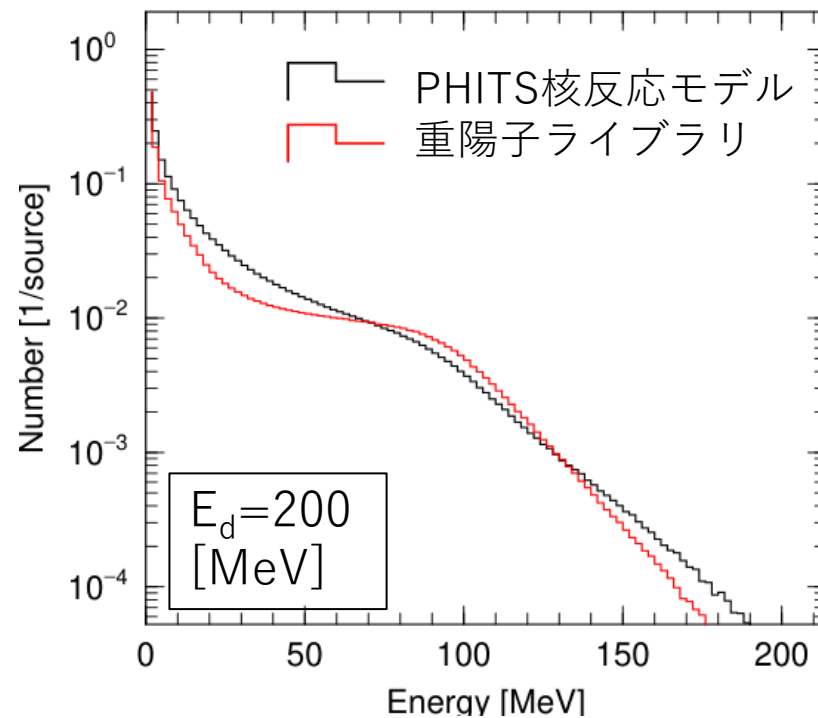
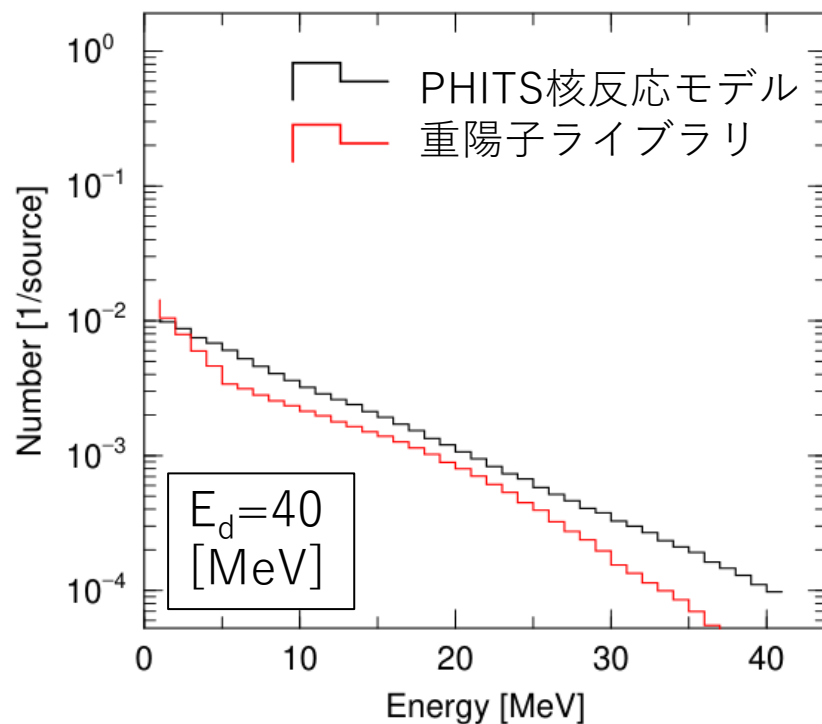
● Li標的への重陽子ビーム入射による中性子生成の計算

- ^{nat}Li 標的に40, 200, 400[MeV]重陽子ビームを入射し、一次反応で生成する中性子のエネルギー分布を算出



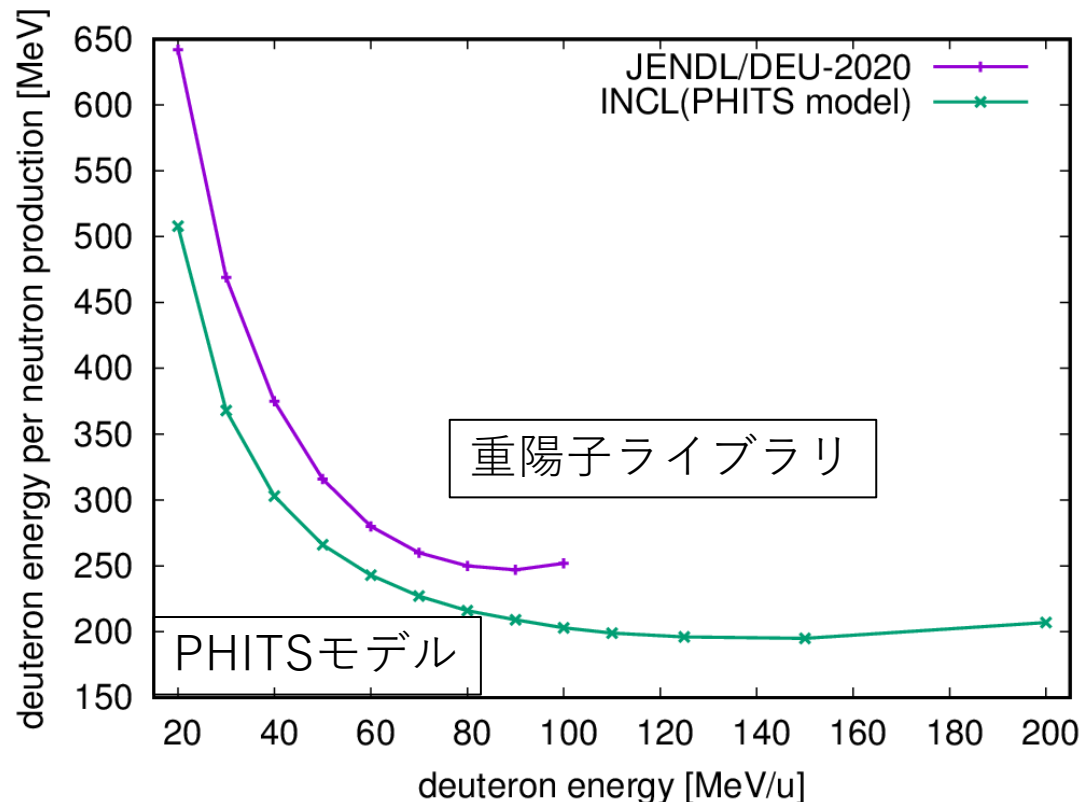
✓ 重陽子一個あたりの中性子生成個数

重陽子エネルギー [MeV]	重陽子ライブラリ		PHITS核反応モデル	
	中性子数	中性子数×エネルギー [MeV]	中性子数	中性子数×エネルギー [MeV]
40	0.06	0.48	0.08	0.73
200	0.79	24.3	0.98	27.9
400			1.79	106



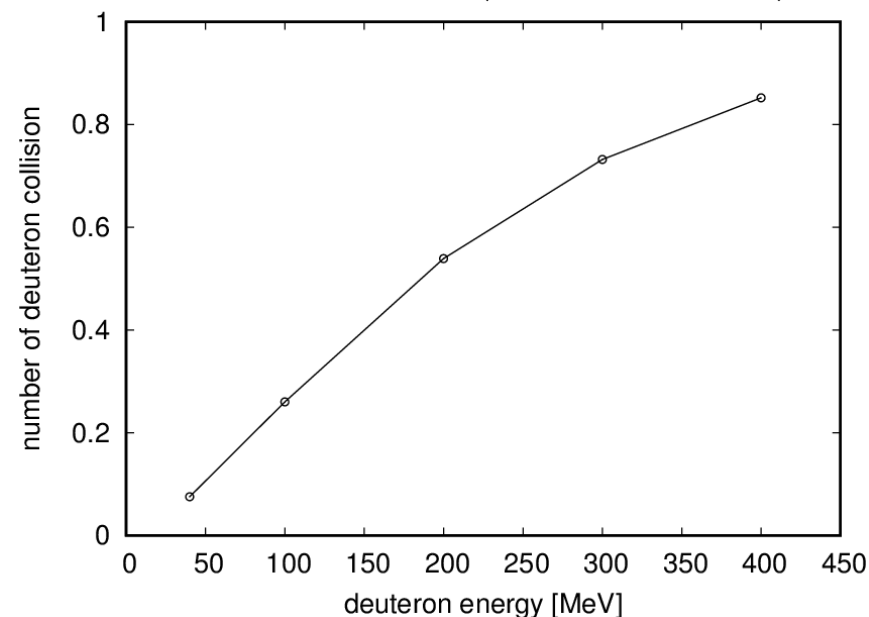
● 中性子生成効率の算出

✓ 中性子生成一個あたりに必要な重陽子エネルギー

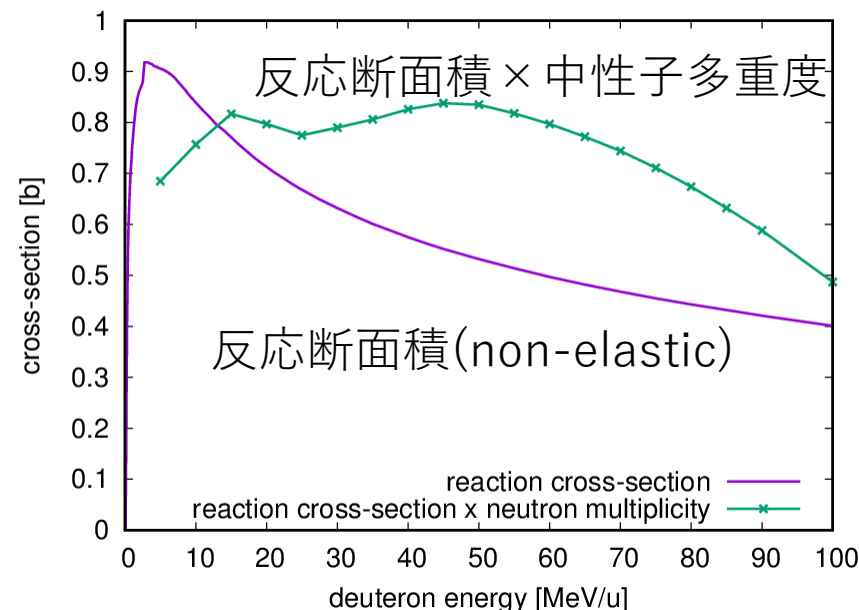


- ~200MeV程度までは飛程が伸びることで中性子生成効率が大幅に向上する
- さらにエネルギーが高くなると核反応回数が一回に近づき、生成効率の向上が頭打ちとなる
- PHITSモデルは~20%程度中性子生成数を過大評価

✓ 核反応回数(PHITSモデル)

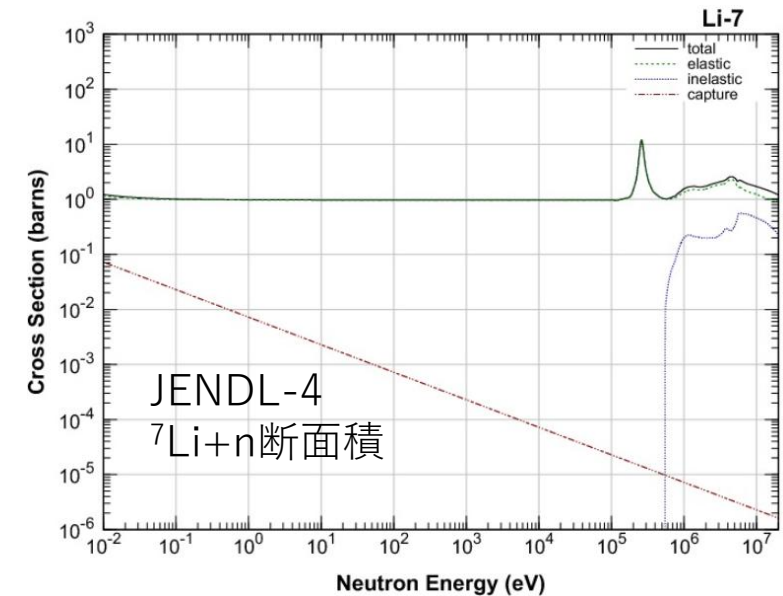
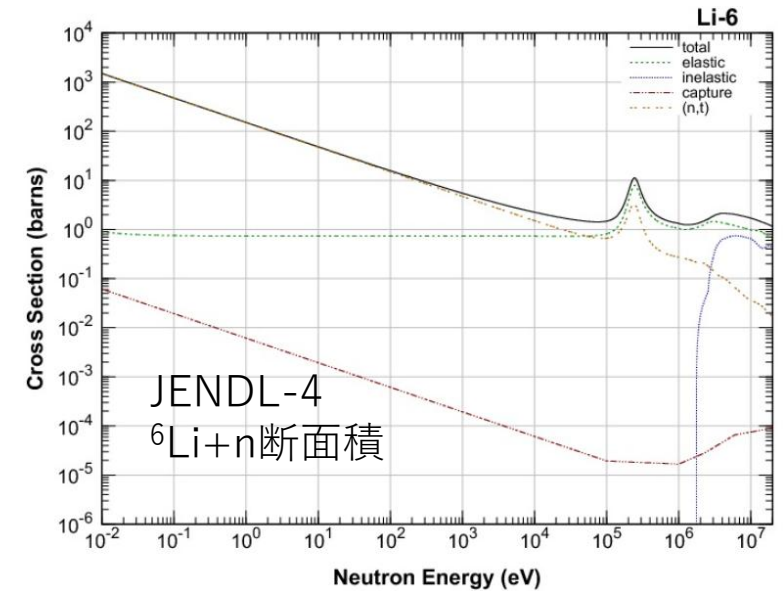
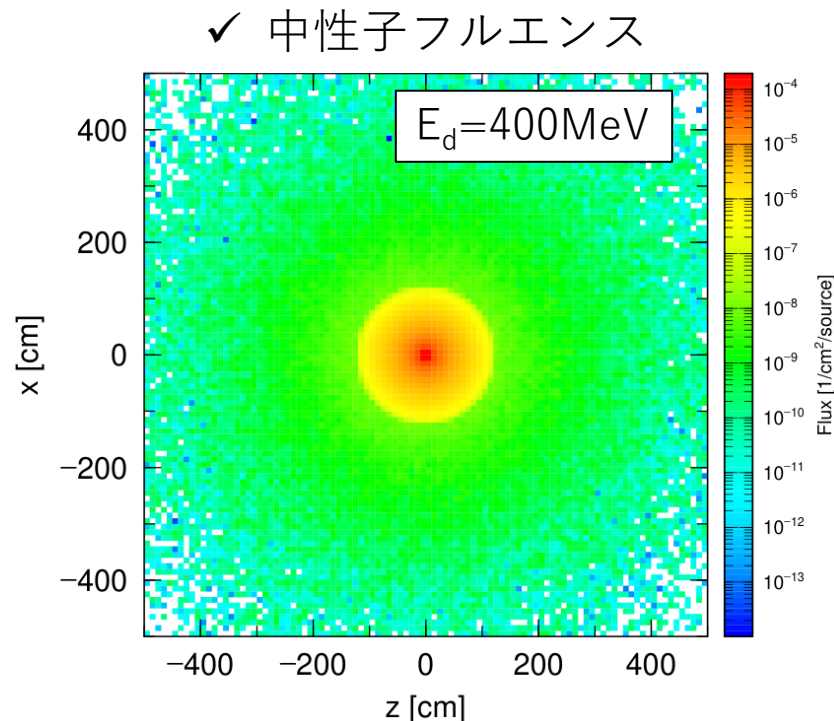
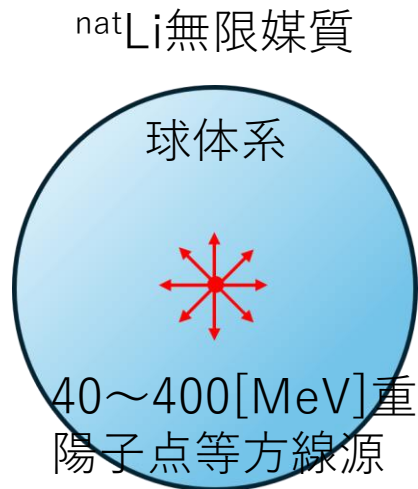


✓ 反応断面積(重陽子ライブラリ)



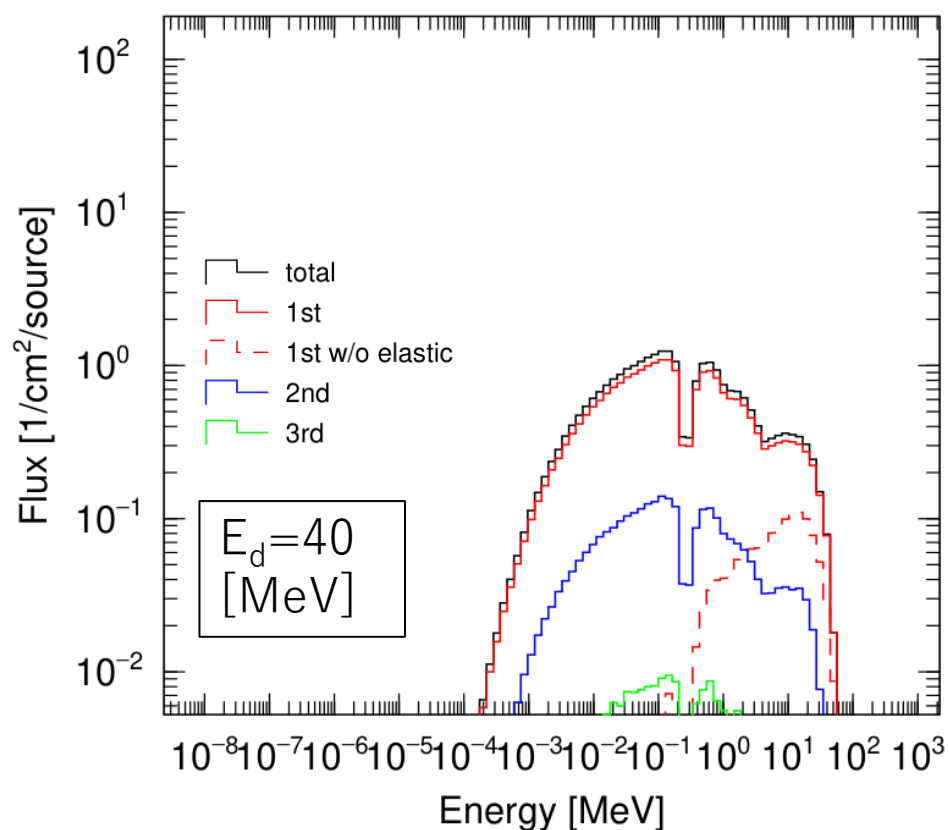
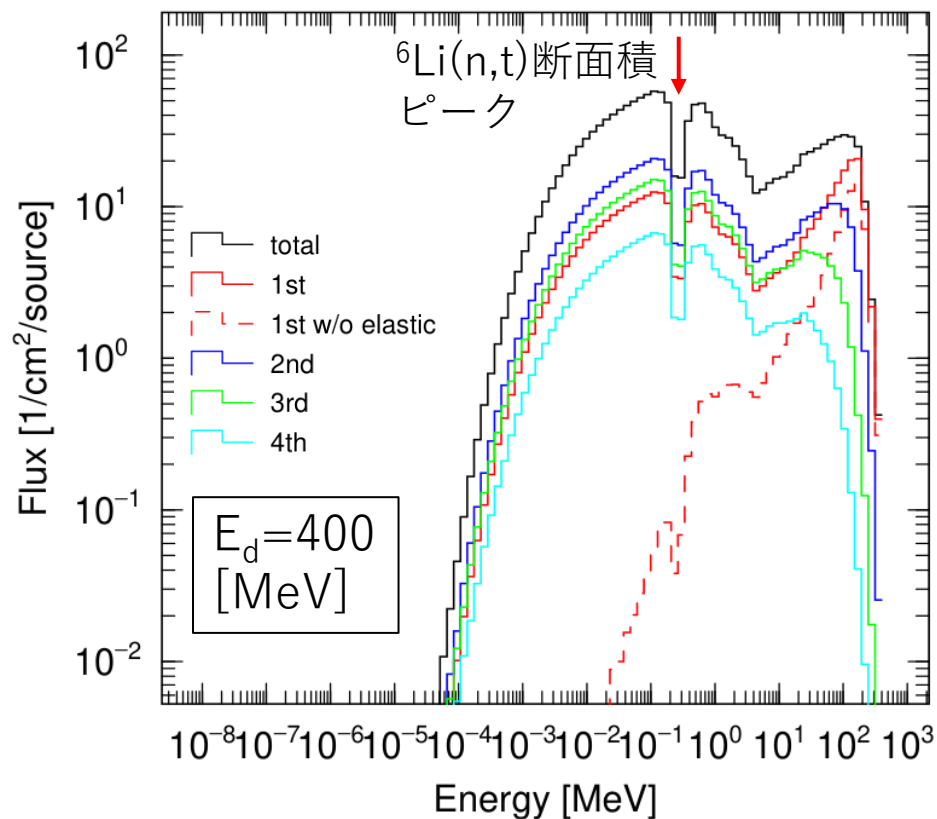
● 生成中性子によるトリチウム生成数の計算

- Li標的への重陽子ビーム入射で生成される中性子が全てトリチウム生成に用いれると仮定した場合のトリチウム生成数を概算
 - ✓ natLi無限媒質(球体系)において重陽子点等方線源を設定し、中性子フルエンス及び破砕反応によるトリチウム生成数を算出
 - ✓ 中性子フルエンスに ${}^6\text{Li}(n,t)$ 断面積を乗じ中性子捕獲反応によるトリチウム生成数を算出
 - ✓ PHITS物理モデル(INCL+GEM)を使用



${}^6\text{Li}(n,t)$ 反応の断面積は ${}^7\text{Li}(n,\gamma)$ 反応の断面積より桁違いに大きいので、 ${}^7\text{Li}$ に中性子を取られることはない

✓ $^{\text{nat}}\text{Li}$ 中の中性子フルエンスエネルギー分布

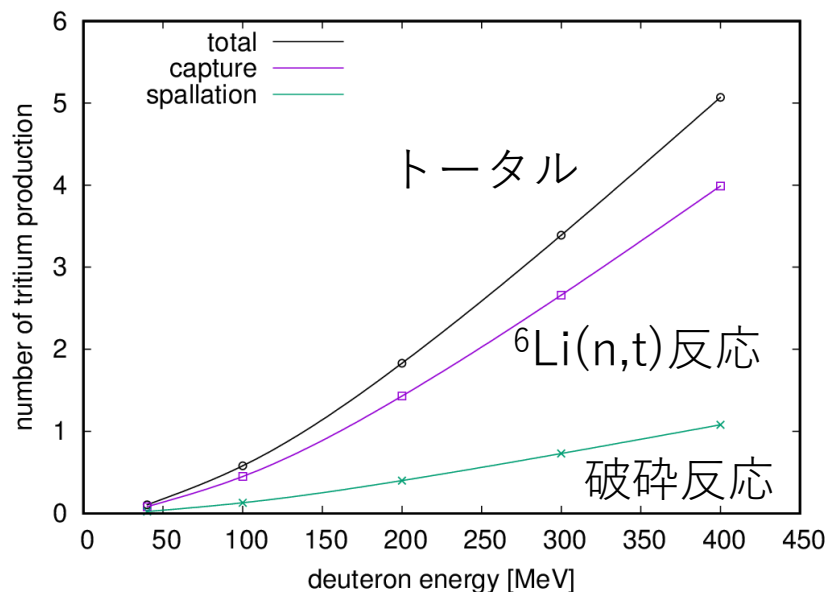


1st :
一次反応で生成した中性子

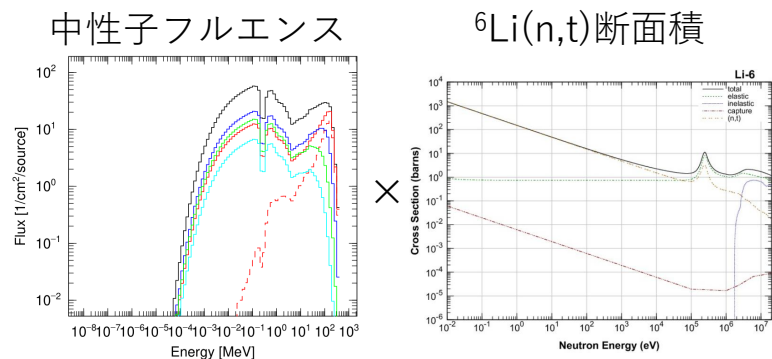
2nd, 3rd ... :
1回, 2回...の非弾性散乱(non-elastic)を経験した中性子

- 40MeV重陽子の場合、1次反応で生成した中性子のフルエンスが支配的
- 400MeV重陽子の場合、は1回, 2回の非弾性散乱を経験した中性子の寄与が $^6\text{Li}(n,t)$ 断面積ピークエネルギーで大きくなっている。→高エネルギー中性子による中性子の増倍効果

✓ トリチウム生成数



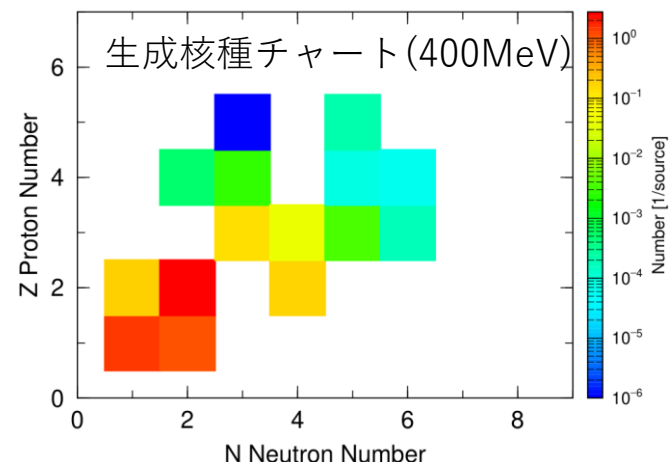
- ${}^6\text{Li}(n,t)$ 反応によるトリチウム生成数



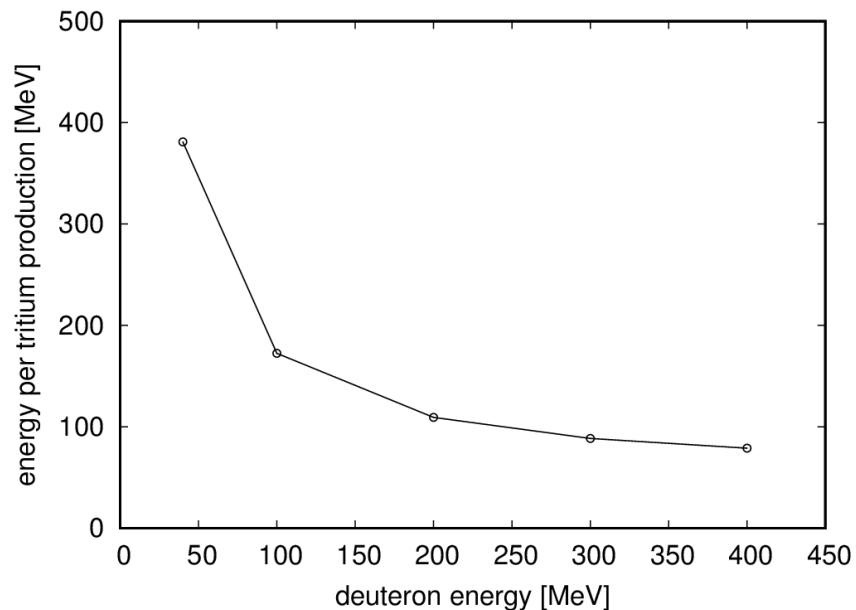
${}^6\text{Li}$ 数密度 $n[10^{24}/\text{cm}^3] \times$ 体積 $[\text{cm}^3] \times$
 中性子フルエンス $[1/\text{cm}^2] \times$ 断面積 $[10^{24}/\text{cm}^2]$
 断面積はmultiplier機能により
 JENDL-4 MT=105を乗じた(20MeV以下)

- 破碎反応によるトリチウム生成数

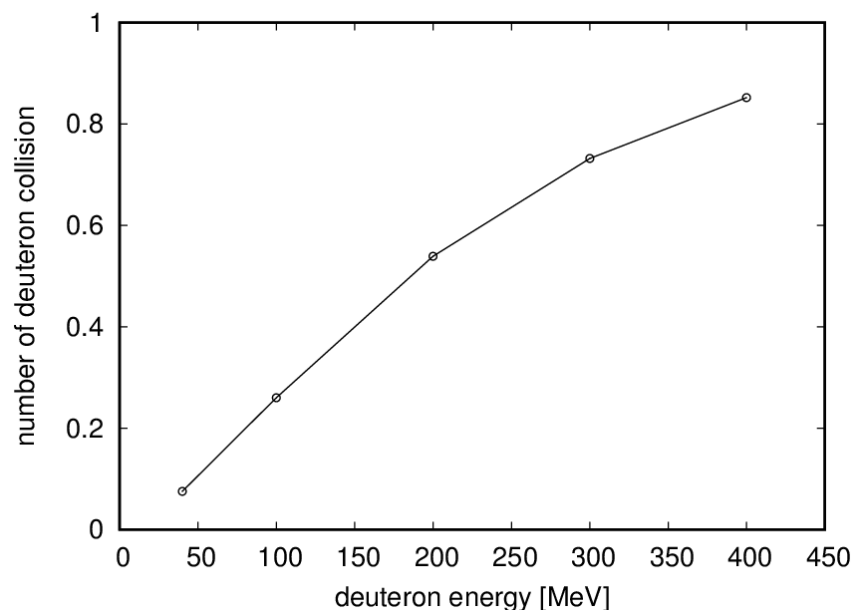
${}^3\text{H}$ 生成イベントを[t-yield]によりタリー。
 ライブラリを用いる20MeV以下の中性子による
 ${}^3\text{H}$ 生成はイベントでないため含まれない



✓ トリチウム生成一個あたりの重陽子エネルギー

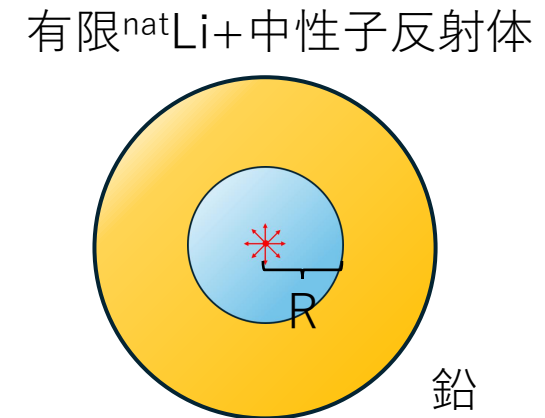
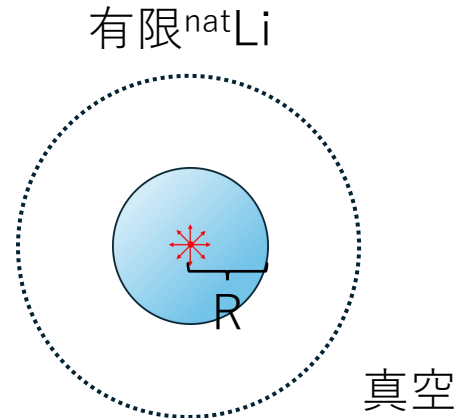
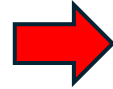
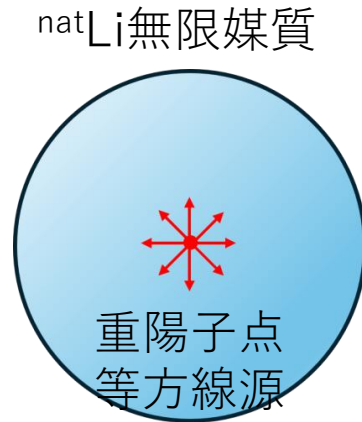


✓ 一次的な重陽子の核反応回数

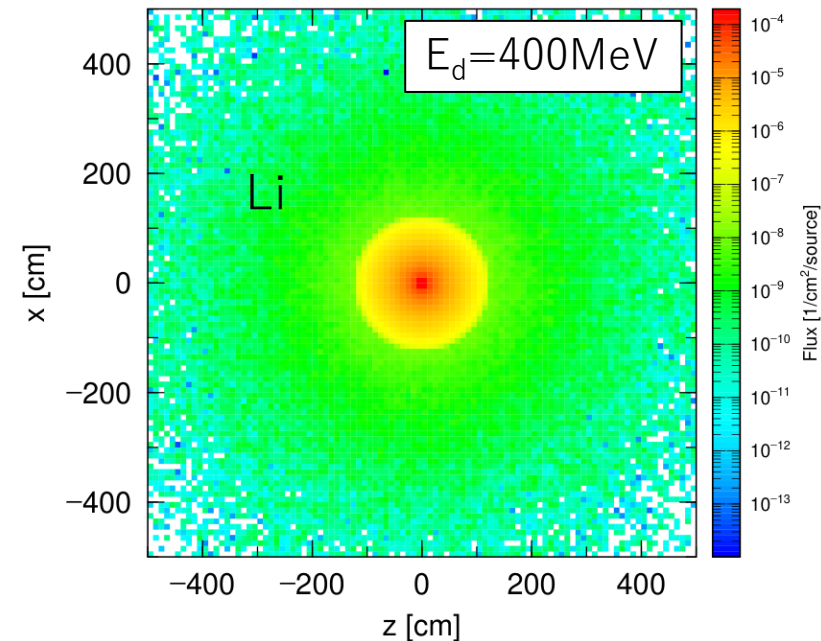


- 高エネルギー中性子による中性子の増倍効果のため、重陽子エネルギーの増加によりトリチウム生成数は際限なく増加する
- 核反応回数が1回に近づくことで重陽子エネルギーあたりの生成効率落ち、400MeV付近でほぼ一定となる

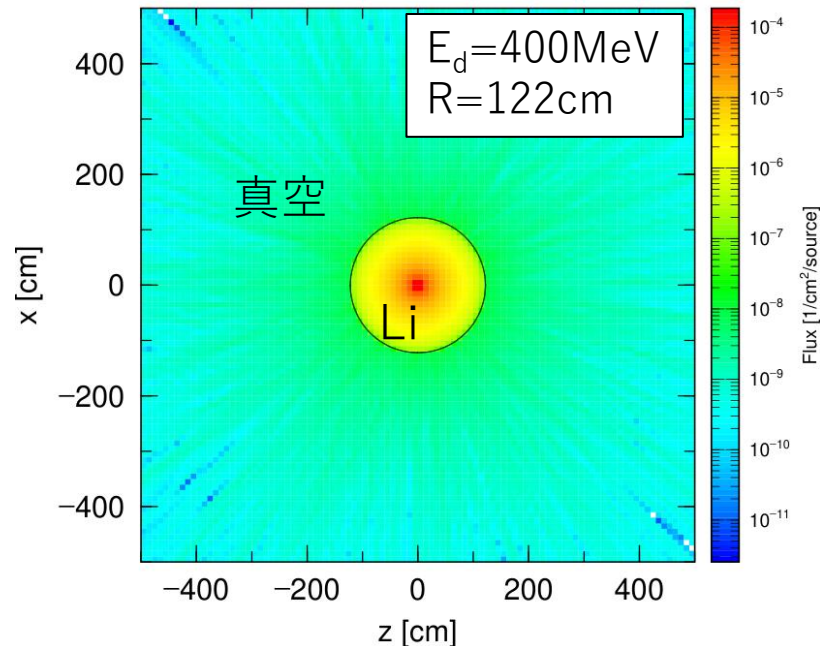
● Liが有限の場合のトリチウム生成数の計算



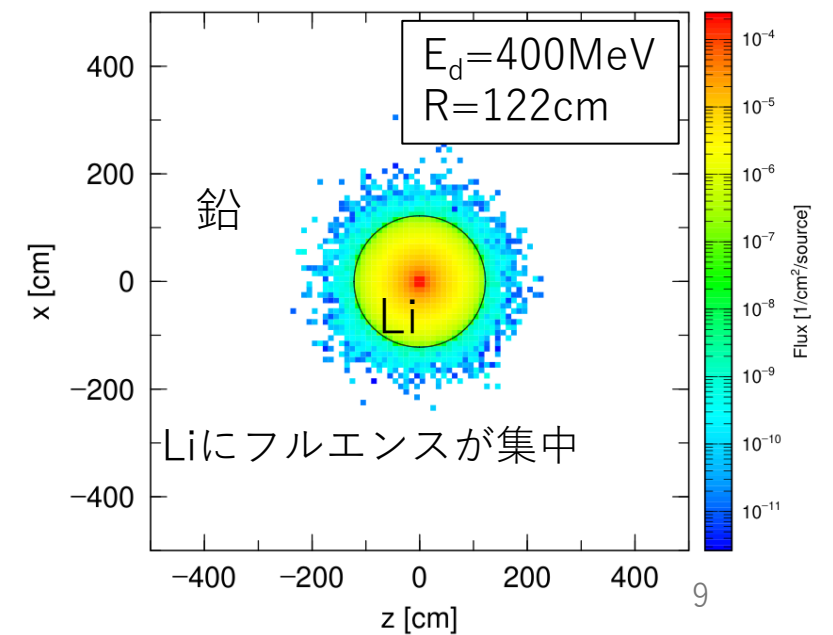
✓ 中性子フルエンス(Li無限媒質)



✓ 中性子フルエンス(有限Li)

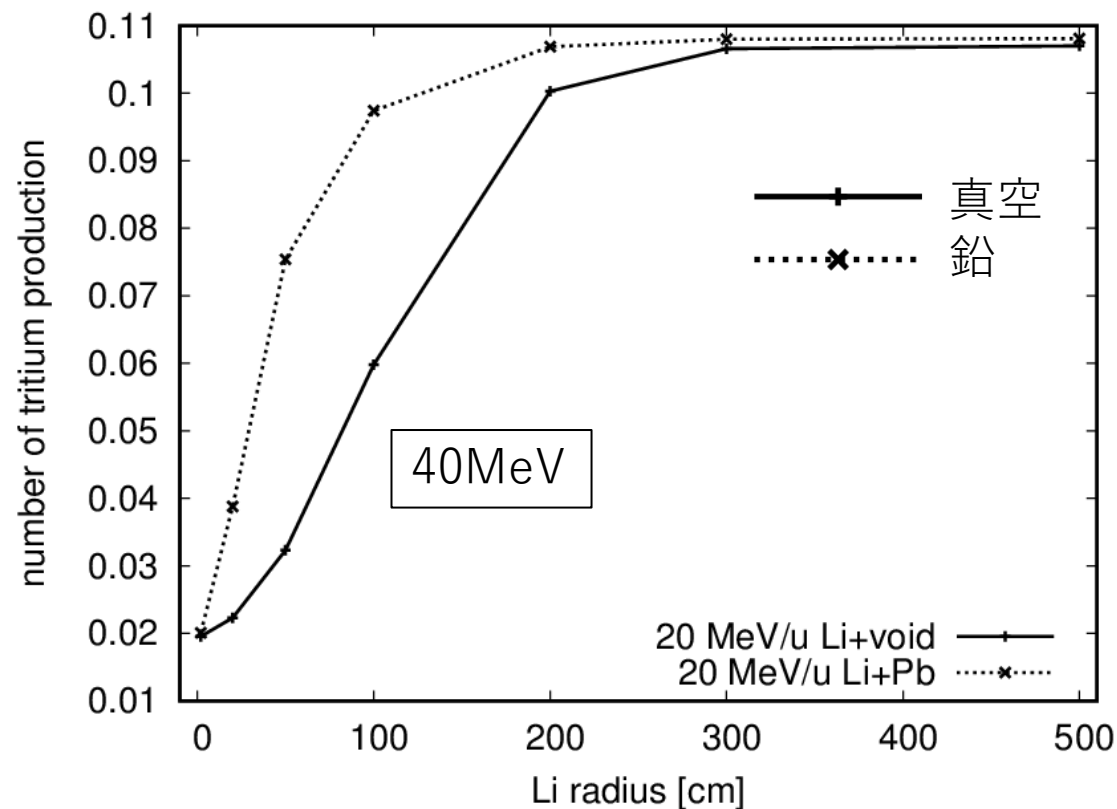


✓ 中性子フルエンス(有限Li+反射体)

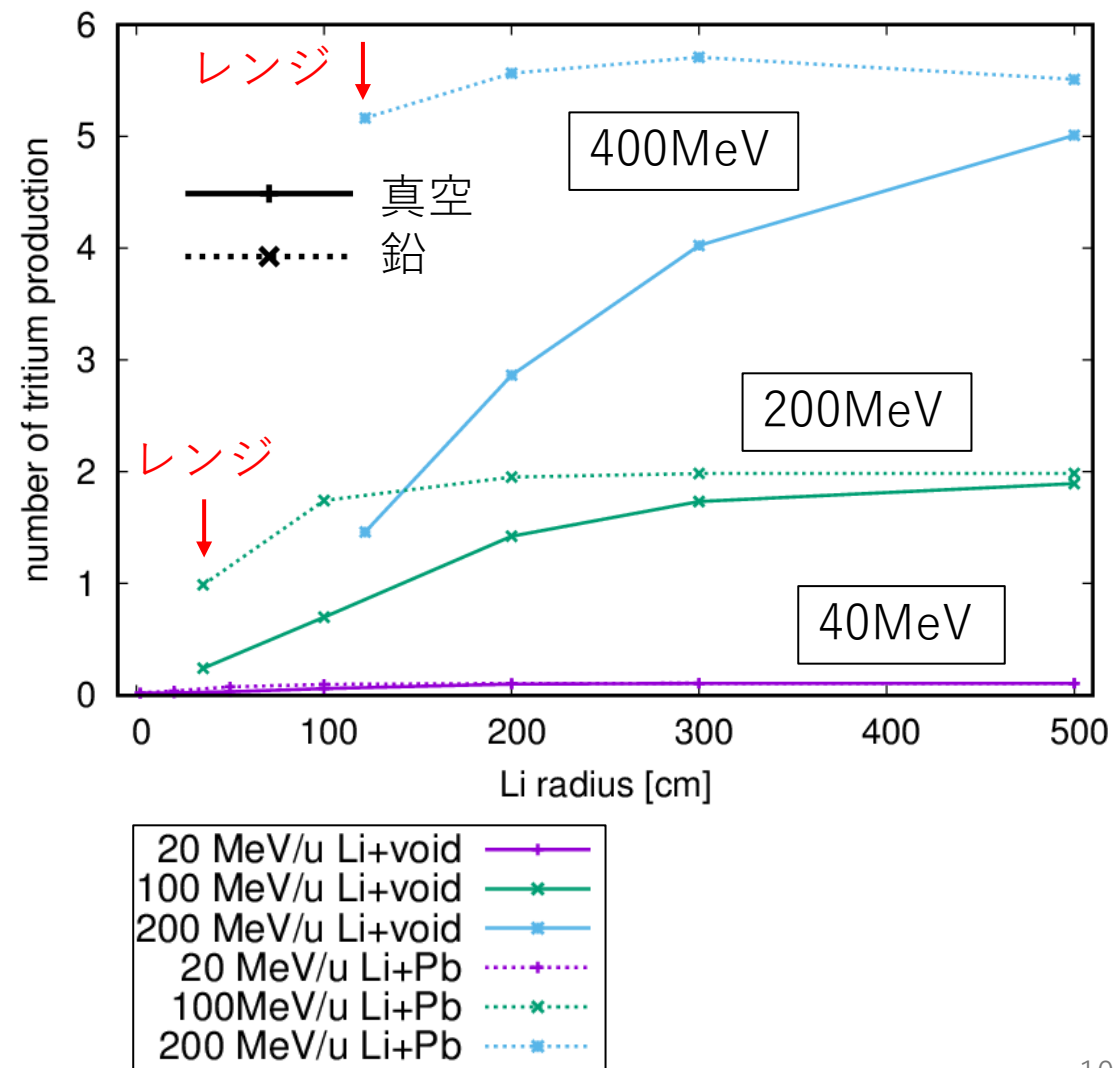


● Liが有限の場合のトリチウム生成数の計算

✓ 重陽子40MeVの場合のトリチウム生成数



✓ 重陽子40, 200, 400MeVの場合のトリチウム生成数の比較



● まとめ

- PHITSを用いたLi標的への重陽子ビーム入射シミュレーションを実施
 - ✓ 400MeVまでの重陽子による中性子生成を計算
 - 中性子生成効率(中性子生成一個あたりに必要な重陽子エネルギー)の重陽子エネルギー依存性を取得
 - 重陽子ライブラリを用いた計算との比較によりPHITS物理モデルを用いた計算精度について検証
 - ✓ Li無限媒質及び有限Li+中性子反射体体系でのトリチウム生成数を概算
 - トリチウム生成効率(トリチウム生成一個あたりに必要な重陽子エネルギー)の重陽子エネルギー依存性を取得