

## ニュートリノ生成施設の放射線場 FLUKA シミュレーション計算 (2)

西田麻耶<sup>#</sup>

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

### 概要

ニュートリノ生成施設では、30 GeV の陽子ビームをグラフィット標的に照射してニュートリノを発生させ、295 km 離れた神岡のニュートリノ検出器に打ち込み、ニュートリノ振動を調べている。今年度から陽子ビーム強度がさらに増強される。昨年度、CERN で開発された FLUKA モンテカルロシミュレーションプログラムを用い、ニュートリノ生成施設 (TS) において、エネルギー GeV から meV にいたる中性子が鉄、コンクリートで遮蔽される様子を円柱対称のモデルを用いて計算し、分子科学研究所における技術研究会で発表した [1]。今回、実際の配置をさらに十分考慮して計算を行うと、中性子発生源として考慮すべき領域、計算時間の見積もり、コンクリート遮蔽体外に置かれた中性子検出器 TLD の測定値との比較の仕方等の情報を得ることができ、実際の遮蔽体配置で計算する見積もりをするのに大変役に立つことがわかった。

### 1. はじめに

東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC のニュートリノ実験施設では、ニュートリノターゲットステーション (TS) において 30 GeV 陽子ビームをグラフィット標的に照射してニュートリノを発生させ、295 km 離れた神岡にあるニュートリノ検出器 (Super-Kamiokande) に打ち込み、飛行中ニュートリノが別の種類のニュートリノに変換するニュートリノ振動を調べている (T2K 実験)。今年度から、陽子ビーム強度が今までより増大し、やがて強度が約 2 倍の 1.3 MW となる。KEK 素粒子原子核研究所ニュートリノグループでは、TS の中性子遮蔽は今までエネルギーが 20 MeV 以上の中性子に対してしか計算されていなかった。CERN で開発された FLUKA と名付けられたモンテカルロシミュレーションプログラム (MC) を習得し、TS の中性子遮蔽を中性子エネルギー GeV から熱中性子 meV の領域まで計算している。地上部で熱蛍光線量計 (TLD) によって測定されている中性子測定結果との比較を行う。

昨年、分子科学研究所で行われた技術研究会において、ビーム標的周辺の遮蔽体を円柱対称のものに近似して計算を行い、陽子標的やその周辺から発生するエネルギー領域 GeV から meV の中性子がどのように鉄及びコンクリートで遮蔽されるかを示した [1]。実際の遮蔽体のジオメトリで遮蔽体外の地上における中性子強度を計算するには大変時間がかかるので、今回、現実の遮蔽体特に地上部に向かうところにある遮蔽体に着目し、それを十分に考慮に入れて円柱対称の遮蔽体を考え、中性子の遮蔽の FLUKA による MC 計算を行った。この方法は非常に有効であり、TS において中性子発生源として考慮すべき領域、コンクリート遮蔽体の外部に置かれた中性子検出器の測定値との比較の仕方、計算時間の見積もりについて有用な情報を得ることができた。

### 2. グラフィット標的周りに散乱される陽子の角度・エネルギー依存性と強度

T2K 実験の 30 GeV 陽子を照射する標的は、直径 26 mm φ 長さ 90 cm のグラフィットである。30 GeV 陽子を照射したとき発生する p、n、 $\pi^\pm$ 、 $\mu^\pm$ 、K のエネルギーと角度依存性を計算した。陽子について、図 1 に示す。前方 5° 以内は、10 GeV 以上の陽子が散乱されるが、角度が大きくなると大きなエネルギーの陽子は指数関数的に少なくなることがわかる。グラフィット標的前方 ±5° 以内に鉄やコンクリートがあるとき、シミュレーション計算を行う際にその領域を含めておく必要がある。

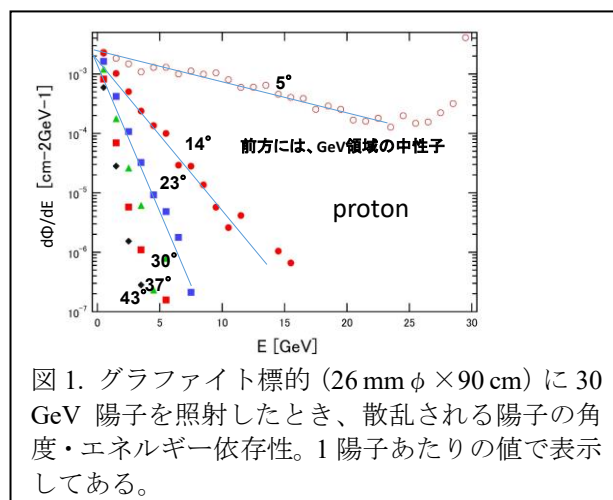
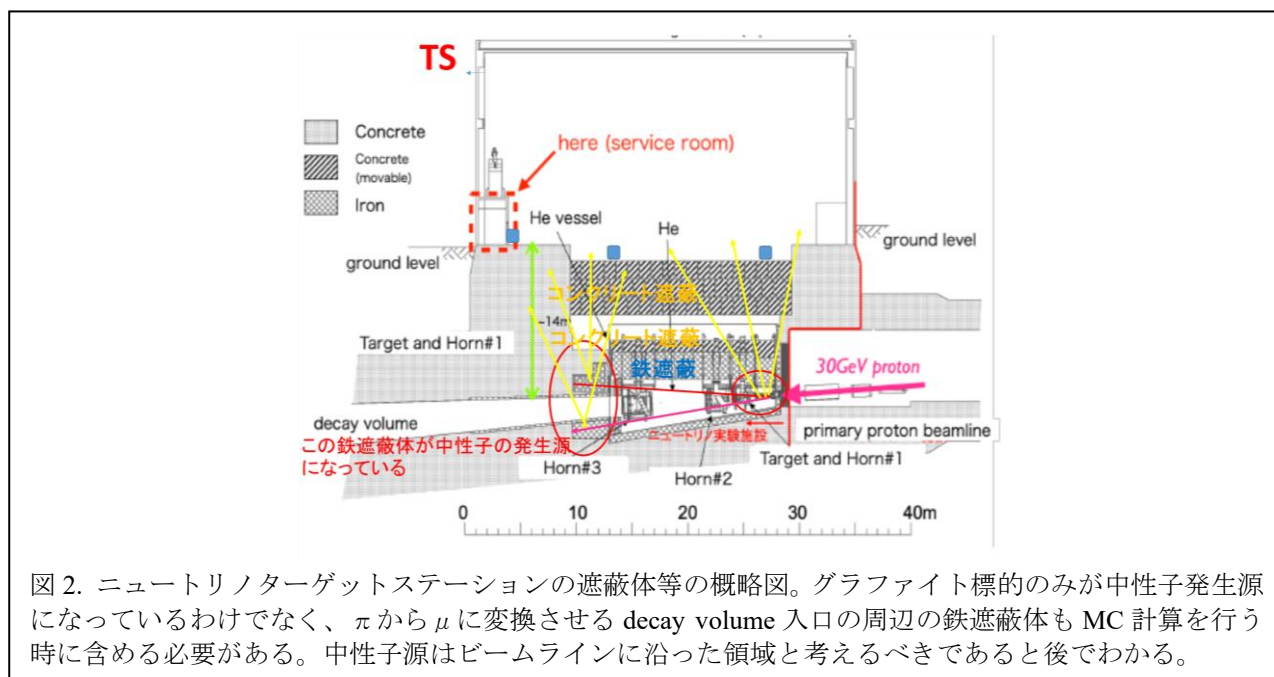


図 1. グラフィット標的 (26 mm φ × 90 cm) に 30 GeV 陽子を照射したとき、散乱される陽子の角度・エネルギー依存性。1 陽子あたりの値で表示してある。

### 3. 実際のジオメトリを反映した円柱対称性を持った遮蔽体モデル

TS のグラフィット標的、遮蔽体を図 2 に示す。グラフィット標的周りには、まず 2 m 厚の鉄遮蔽体、その外に 1 m 厚さのコンクリート遮蔽体、上部地表の方向には 4.5 m のコンクリート遮蔽体が設置されている。ビーム下流には発生した  $\pi$  を  $\mu$  に変換させる decay volume があるが、その領域の入り口周辺の鉄も MC 計算を行うときに含めておく必要があることがわかる。

次に地表の方向に対しての中性子遮蔽を考えるのに、図 3 のように円柱対称の鉄及びコンクリート遮

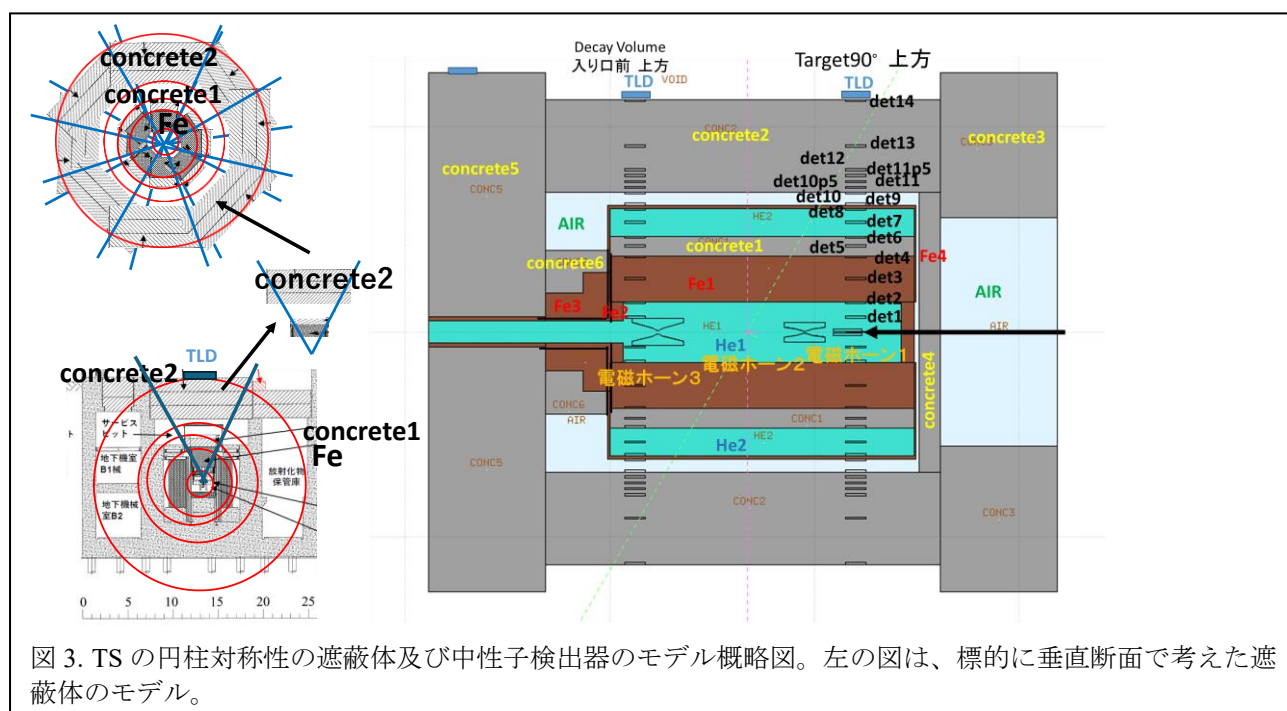


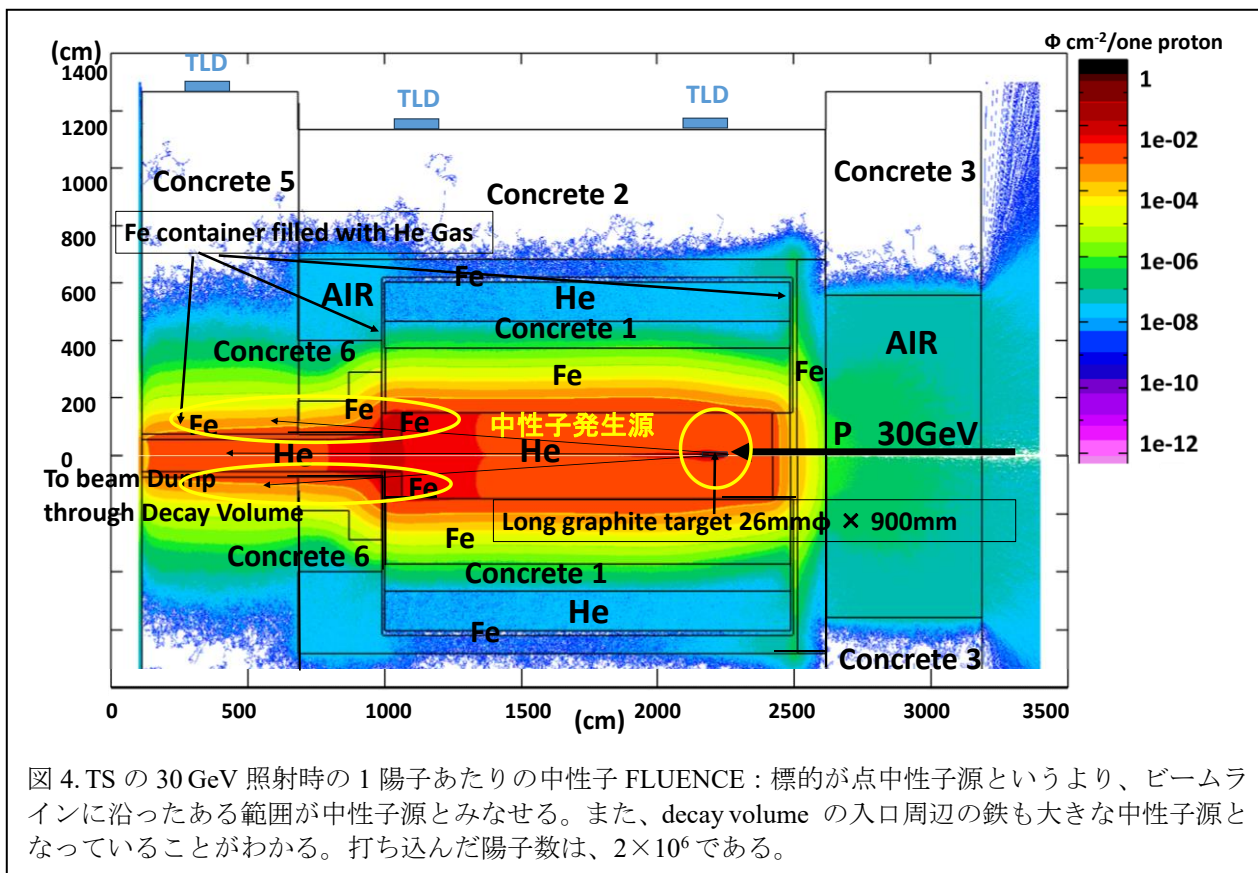
蔽体を考えるモデルを考案した。陽子ビームラインから、地上方向を見込む扇型を考え、それをビームラインを中心に配置させて、それを円柱状に近似する。図3の左に、グラファイト標的に垂直な断面での概念図を示した。

中性子検出器も図3のようにドーナツ状（幅 100 cm、厚さ 10 cm）のものを図のように配置した。これにより検出される中性子の数を大幅に増やせるので、計算時間を短縮することができる。

グラファイト標的を 30 GeV 陽子で照射したとき、放出される中性子の Fluence を FLUKA モンテカルロシミュレーションプログラムで計算した値が 1 陽子あたりに換算して図4に示されている。MC 計算で打ち込んだ陽子数は、 $2 \times 10^6$  である。エネルギーは区別されていない。中性子の発生源は、グラファイト標的が点線源となっておらず、陽子ビームラインに沿った領域全体が発生源となっており、decay volume の入口あたりも大きな中性子発生源であることもわかる。中性子遮蔽のシミュレーション計算をする場合にはこの領域を配慮する必要がある。

#### 4. TS での 30 GeV 照射時の中性子放射場



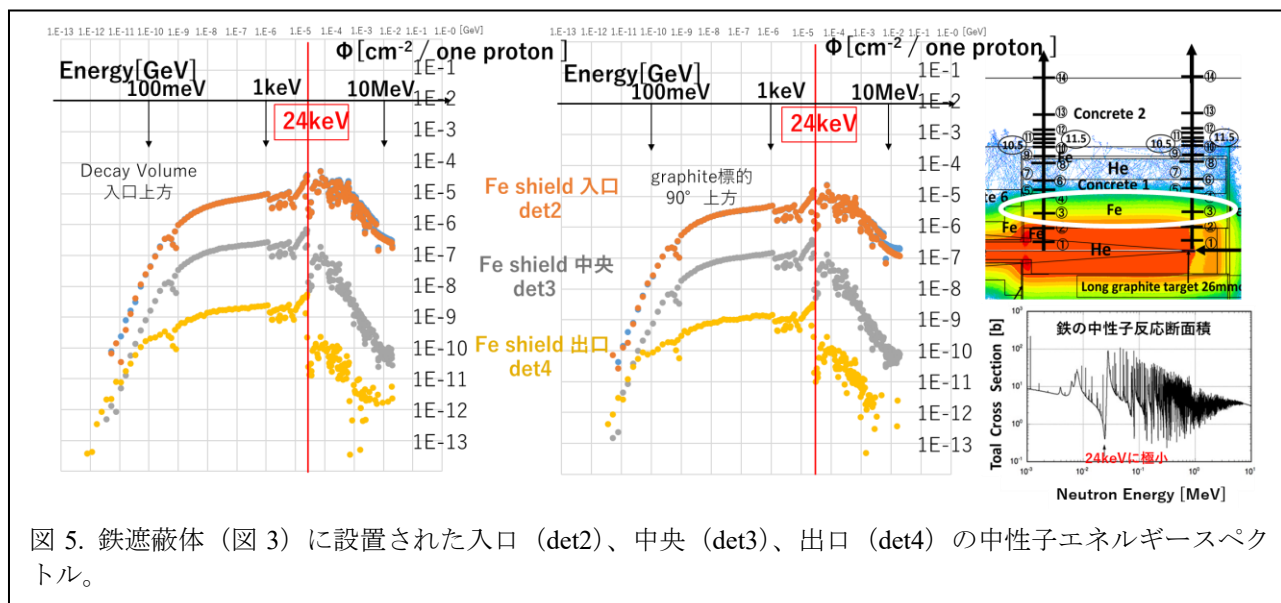


## 5. 中性子の鉄およびコンクリート遮蔽隊による遮蔽の様子

### 5.1 鉄による中性子遮蔽

図5に30 GeV照射の際の2.2 m厚鉄遮蔽体の入口、中央、出口における中性子エネルギースペクトルが1陽子あたりのFluenceとして示されている。10 MeV以上のエネルギーの中性子は6桁以上減衰している。これより高いエネルギーの中性子は2.2 m鉄シールドで遮蔽されること

がわかる。鉄は24 keVに中性子反応断面積の極小値を持つことが知られており、この周辺のエネルギーの中性子の透過は大きい。これより小さいエネルギーの中性子の減衰は4桁以下で1 eVでは鉄遮蔽体で3桁も減衰しない。100 keV以下の中性子は減衰するが2.2 m鉄遮蔽体を通過する。また、グラファイト標的直上よりdecay volume入口真上の方が中性子Fluenceは大きい。陽子標的が最大の中性子発生源でないことがわかる。



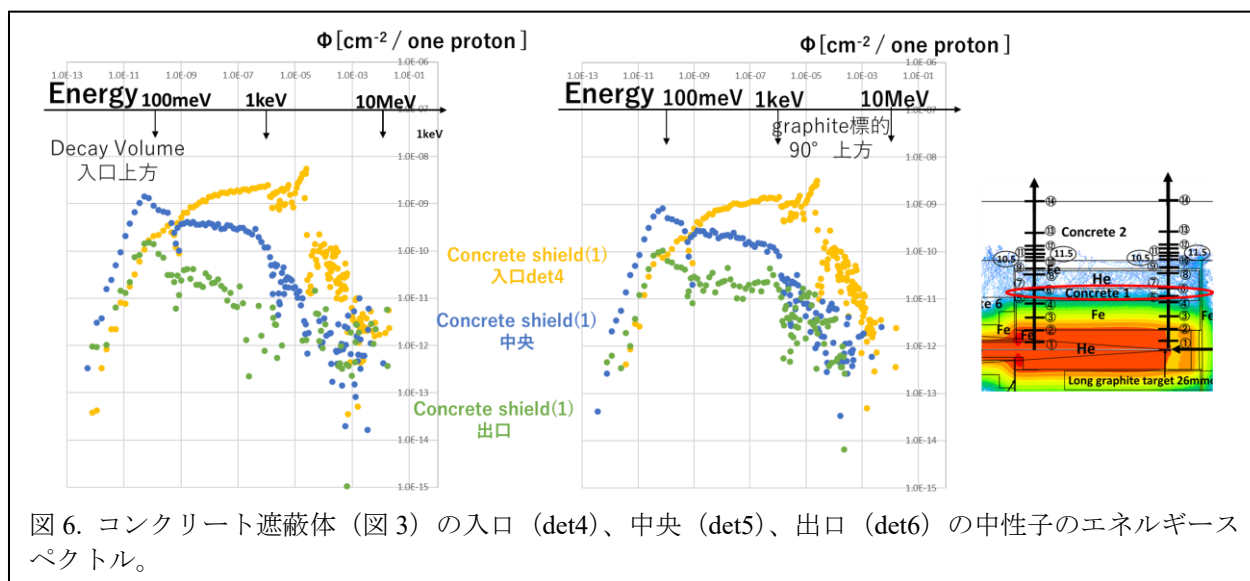


図6. コンクリート遮蔽体 (図3) の入口 (det4)、中央 (det5)、出口 (det6) の中性子のエネルギースペクトル。

### 5.2 コンクリートによる中性子遮蔽

図6に、鉄の外側にある1mコンクリート遮蔽体による中性子遮蔽の様子を示す。鉄の中性子反応断面積が極小である24keVあたりの中性子はピークをなしてコンクリートに入射してくる。検出器det4では24keV周辺に大きな値を持っていたスペクトルが、det5では25meVあたりにピークを持つスペクトルとなる。数10keVの中性子が熱中性子になる様子がきれいに観測されている。さらにコンクリートを通過してゆくと中性子は減衰するが1/10程度で1mコンクリート遮蔽体を透過する。その外側の4.5mコンクリート遮蔽体で、熱中性子等の低エネルギー中性子は吸収される(図7)。本計算は、 $2 \times 10^6$ の陽子を打ち込んだ計算で、Fluenceが $10^{-12} \text{cm}^2/\text{one proton}$ が誤差の限界となっている。深さ約100cmまでが計算しうる限界である。100keV以下の中性子の総和を取ると、コンクリート内で減衰する様子が、誤差は大きい観測できた。この計算値とコンクリート外部で測定されている中性子線量測定値との比較を試みる。

### 6. FLUKA シミュレーション計算値と熱蛍光線量計測定値との比較

J-PARCの放射線管理セクションが、熱蛍光線量計TLDを用いて、コンクリート遮蔽体外部のグラファイト標的直上、Decay Volume入口直上、制御室前(図3)の中性子の放射線量を2020年30日間、陽子入射総数 $2.12 \times 10^{20}$ 個で測定した。陽子数 $10^{20}$ 個当たりの放射線量を表1に示した。Fluenceの値は、文献[2]に従って測定したSvから換算した。

このTLD測定値から、MC計算に必要な照射陽子の個数を見積もる。例えば、Decay Volume入口上方で中性子を100個検出するには、今回計算で用いているドーナツ形状の検出器(det14、面積約 $10^6 \text{cm}^2$ )で陽子を約 $10^{10}$ 個照射する必要がある。現在計算に使用しているワークステーションでは、図3の円柱対称モデルで $2 \times 10^6$ 個陽子照射の計算をするには、10日間かかる。 $10^{10}$ 個陽子照射計算には約137年かかることになる。現実のジオメトリーでの計算では、検出器面積は、 $10^4 \text{cm}^2$  (1m×1m)程度にしか

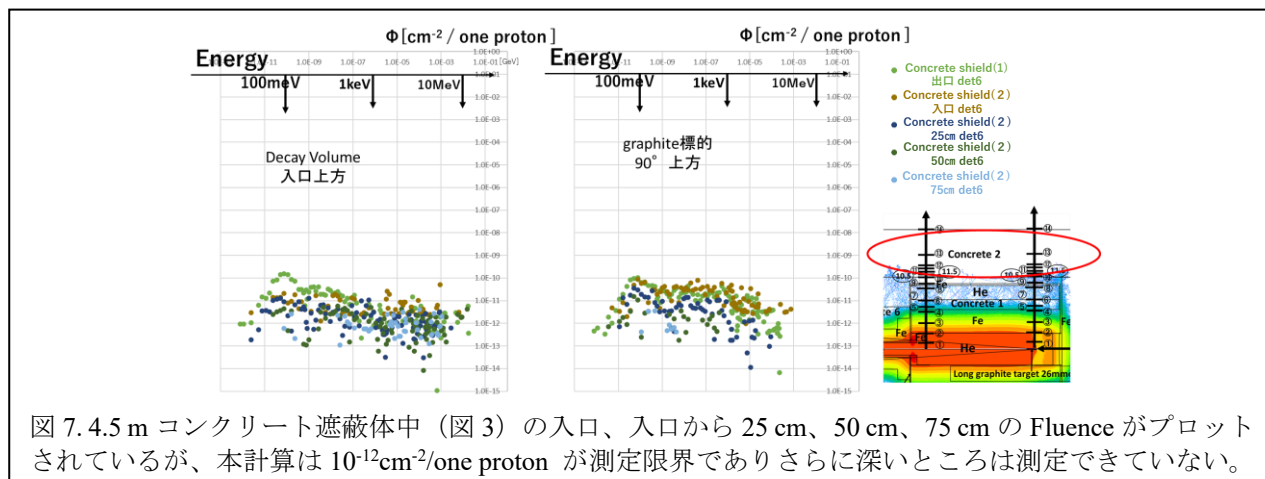


図7. 4.5mコンクリート遮蔽体中(図3)の入口、入口から25cm、50cm、75cmのFluenceがプロットされているが、本計算は $10^{-12} \text{cm}^2/\text{one proton}$ が測定限界でありさらに深いところは測定できていない。

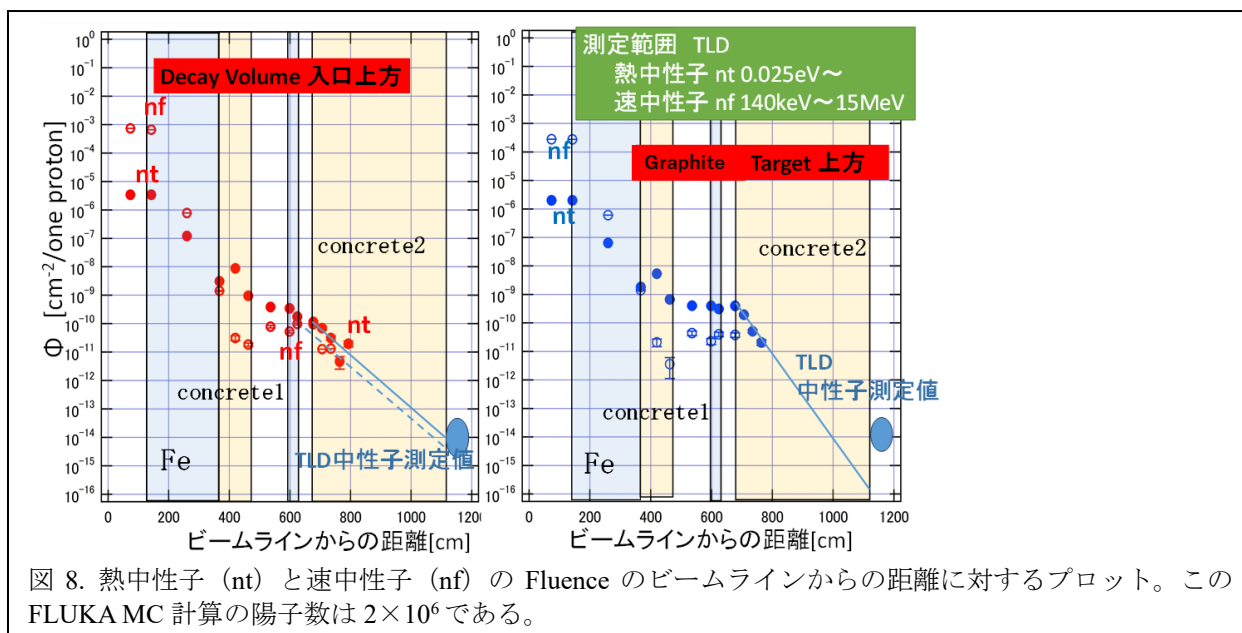


図 8. 熱中性子 (nt) と速中性子 (nf) の Fluence のビームラインからの距離に対するプロット。この FLUKA MC 計算の陽子数は  $2 \times 10^6$  である。

できないので、地上部での放射線量を直接 MC 計算するのは非現実的である。4.5 m コンクリート遮蔽体内部に検出器を設置し、その値を外挿して測定値と比較する必要がある。

陽子  $2 \times 10^6$  個照射して FLUKA MC で計算した遮蔽体内の中性子スペクトル (図 5,6,7) から得られた熱中性子 ( $E \sim 25$  meV)、速中性子 ( $140$  keV  $< E < 15$  MeV) の Fluence をビームラインからの距離に対して図 8 にプロットした。4.5 m コンクリート 2 の遮蔽体中では、中性子は減衰し、1 m 程度で計算誤差の中に入る。TLD 測定値と比較するためには、コンクリート 2 の入口から 1 m 付近までの計算値を表面まで外挿して Fluence を求めた。Decay Volume 入口上方の熱中性子、速中性子ともにその外挿値は、約  $10^{-14}$  cm<sup>2</sup>/one proton となり、TLD 測定値と大体一致している。中性子遮蔽は、図 3 に示した陽子ビームラインから見て地上方向にある鉄、コンクリートシールドが作る扇型の部分が中性子遮蔽を大部分引き受けていて、それ以外からの寄与は大きくないと考えれば理解できる。Target 上方では、熱中性子は  $10^{-16}$  cm<sup>2</sup>/one proton とずっと小さな値で、速中性子はコンクリート 2 ですでに誤差の限界で測定できず、外挿値は求まらなかった。陽子ビーム周辺のコリメータ及びその周辺の鉄、コンクリートシールドが図 3 で示す円柱対称モデルに反映されていないからと推測している。実際の遮蔽体の配置を考慮に入れた円柱対称遮蔽体モデルは地上部分の中性子遮蔽を再現でき、計算時間は 100 倍短くて良く、大変有効であると考えられる。ある地上部分の中性子遮蔽を計算するのに、陽子ビームラインに沿ってどれだけの領域を含めるべきかも確認できた。

## 7. まとめ

FLUKA モンテカルロシミュレーションプログラムを用いて、ニュートリノ標的エリアの中性子遮蔽を GeV から meV のエネルギー領域まで行った。鉄、コンクリートの遮蔽体を実際のジオメトリーを注意深く考慮に入れて、円柱対称のモデルを考案した。地上部分の中性子線量は測定値と良い一致を見、計算時間は、100 倍程度短縮できた。中性子源はグラフアイト標的の点源ではなく、陽子ビームラインに沿ったある領域を考える必要があることが分かった。その領域が適切であるか否かは、円柱対称モデルの計算で確かめられることが分かった。

10 MeV 以上の中性子は 2.2 m の鉄遮蔽体で遮蔽されること、また鉄遮蔽体を透過した中性子がコンクリート中でエネルギーを失い熱中性子に変わってゆく過程を明確に示すことができた。遮蔽体外部の中性子線量を計算で見積もるには、4.5 m コンクリート内での中性子の減衰から外挿して求める必要があることが分かった。

表 1. TLD 測定結果 (陽子数  $10^{20}$  個当たり)

場所	線量	Fluence [cm <sup>2</sup> ]
Decay Volume 入口上方	熱中性子: $5.1 \mu$ Sv	$0.9 \times 10^6$
	速中性子: $650 \mu$ Sv	$1.3 \times 10^6$
Target 上方	熱中性子: $4.1 \mu$ Sv	$0.7 \times 10^6$
	速中性子: $380 \mu$ Sv	$0.8 \times 10^6$
制御室前	熱中性子: $1.9 \mu$ Sv	$0.3 \times 10^6$
	速中性子: $49 \mu$ Sv	$0.1 \times 10^6$

## 参考文献

- [1] 西田麻耶、“ニュートリノ生成施設の放射線場 FLUKA シミュレーション計算—中性子を主に—”、2022 年度分子科学研究所技術研究会、2023 年 3 月 9 日。  
 [2] JAEA—Technology 2009-022 (2009)