

テトラメチルシランを用いた高エネルギー中性子検出器の実現可能性について

天造秀樹*

Feasibility Study on High-Energy Neutron Detector Using Tetramethylsilane

TENZOU Hideki*

Synopsis

It is insufficient to measure precisely nuclear reaction data for high-energy neutrons from 100MeV to 500MeV due to the lack of measurement results. Therefore, it is necessary to detect high-energy neutrons with good efficiency to establish high-accuracy nuclear reaction data. Liquid Tetramethylsilane (TMS) has potential to detect high-energy neutrons with high efficiency. Liquid TMS works as a proton radiator because protons are emitted from the reaction by incident neutrons. TMS has good character such as liquid at room temperature and it contains one carbon nucleus and three hydrogen nuclei and Silicon at the center. We estimated the geometry of the TMS detector.

1. 緒言

100MeV から 500MeV の高エネルギー中性子を測定したデータは原子力分野、重イオンガン治療、宇宙船内での被爆評価、施設の遮蔽設計において重要である。特に、高レベル放射性廃棄物を核変換する加速器未臨界システム (Accelerator Driven System、以下 ADS と記す) においては臨界を維持するために精度の良い高エネルギー中性子核データが要求される。しかしながら、このように高いエネルギーの中性子は透過力が大きく、検出効率が 1[%]以下のものしかない。そこで、当研究室では、平成 16 年度から検出効率 10[%]程度の高エネルギー中性子検出器の開発を試みている。前年度までは反跳陽子を測定する方法を採用し、反跳角を測定するためにメタンから出るシンチレーション光が必要であった。しかしながら、今回考案した測定原理を用いれば、シンチレーション光が必須では無くなり、新しい材料を検討してみることにした。

そこで、本研究では大きな検出効率をもつ高エネルギー中性子検出器として常温で液体のテトラメチルシラン ($(\text{CH}_3)_4\text{Si}$ 、以下 TMS と略す) が有用と考え、その実現可能性について、検討を行うこととした。

2. 一次元反跳陽子法

メタンを用いた従来の反跳陽子法では時間投影型比例計数管を用いて、3 次元位置情報と電荷情報からそれぞれ散乱角 θ と反跳陽子 E_p のエネルギーを求め、以下の式から中性子のエネルギー E_n を決定する。

$$E_n = \frac{E_p}{\cos^2 \theta} \cdots (1)$$

今回考えた一次元反跳陽子法を図 1 に示す。角度 θ の情報を 1 次元で取得する方法である。まず 1 次元検出器から計測した入射軸方向の軸投影長 L を元に以下の式より中性子のエネルギーに変換する手法である。次に L を求める際には 1 次元検出器のアノードで読みとった電離電子の電荷量から求める。この回路から電離電子 e^- がアノードワイヤに当たった時の信号を読み取ることができる。読みとった信号から L がわかる。また電離電子の全電荷量を Q と置くと、 Q と電圧 V の関係は以下の式で表される。

$$V = \frac{Q}{C_f} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \cdots (2)$$

このときの最大電圧 V_{\max} は以下の式で表され

*電子工学科

る。

$$V_{\max} = \frac{Q}{C_f} \dots (3)$$

これを Analog to Digital Converter(ADC)で V_{\max} を記録する。したがって Q より V_{\max} が計算によって求められる。つぎに V と陽子のエネルギー E_p の関係は以下のように比例関係にあると推測できる。

$$V \propto E_p \dots (4)$$

この式から V より E_p は計算によって求められると考えられる。また飛程 L と陽子のエネルギー E_p は比例関係と考えられるので E_p より L も計算によって求められると考えられる。

$$\cos \theta = \frac{L'}{L} \dots (5)$$

3 . TMS

反跳陽子ターゲット媒質を比較した表を表1に示す。TMSは常温で液体であるため、メタンのように液体窒素以下まで冷却するシステムが不要である。水素の数密度が大きく、中性子と弾性散乱される確率が高い。また、シリコン原子が含まれているあるため、密度が大きく反跳陽子を停止させるまでの距離(飛程)が小さい。このため、検出器をコンパクトにできる可能性を持つ。

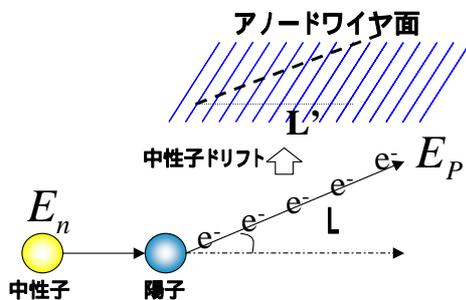


図1 . 一次元反跳陽子法

表1 . 反跳陽子ターゲット媒質の比較

分子	水素の数密度 $\times 10^{22} [n/cm^3]$	飛程 [m] for 500MeV 陽子	液相温度[度]
水素(H ₂)	4.2	8	-223 ~ -217
メタン(CH ₄)	5.1	1.6	-147 ~ -117
TMS(CH ₃)Si	5.3	0.8	-99 ~ 27

4 . 陽子の飛程

ベータ・プロットホの式で各媒質中での陽子の飛程を求めた。計算は液体水素、液体メタン、テトラメチルシランについて0.1[mm]のメッシュ幅刻みで行った。計算した結果を図2に示す。500MeVの中性子が検出器に入射した場合、式(1)から反跳陽子の散乱角度と飛程の関係を計算したのが図3である。反跳陽子を検出器内で停止させるためには0度方向に0.88[m]、90度方向に0.32[m]必要になる。

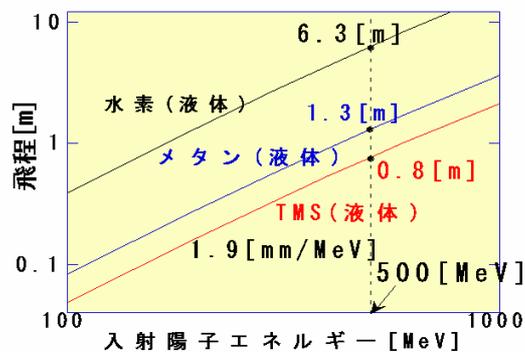


図2 . 陽子の飛程とエネルギーの関係

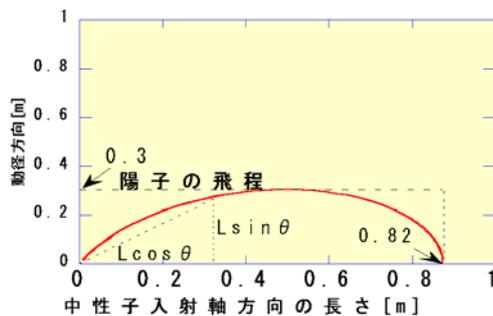


図3 . 500MeV 中性子に対する陽子の散乱角と飛程の関係

5 . 水素の非弾性散乱断面積

反跳陽子法は水素が弾性散乱されることを想定している。そのため、非弾性散乱の影響が検出エネルギーの上限になると考えた。Chibaら¹⁾が高エネルギー中性子に対する弾性散乱断面積 σ_e と非弾性散乱断面積 σ_{en} について測定した結果を図4に示す。水素は単原子であるが、500MeV程度の中性子が衝突すると、陽子自身が変形し、振動を起こしていることがわかる。弾性散乱の断面積から平均自由行程を求め、検出効率を10[%]程度と考え、入射中性子のうち10[%]が1度は弾性散乱するまでの距離を計算したものを図5に示す。500MeVの中性子に対し、62[cm]程度の入射軸方向の大きさが必要となることがわかる。

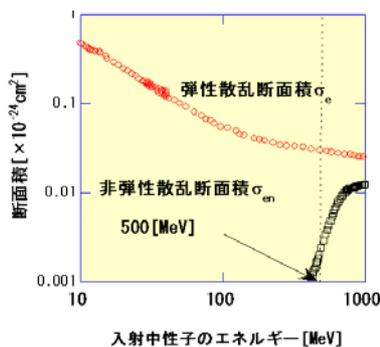


図 4. 中性子入射に対する陽子の散乱断面積

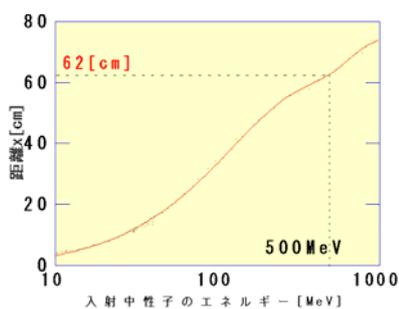


図 5 . 中性子が 10[%]弾性散乱するまでの距離

6 . まとめ

これまででは、メタンから発生するシンチレーション光をもとに3次元の飛跡を求め、散乱角を解析する方法を考えていた。今回考案した次元反跳陽子法を用いれば、1次元検出器のみで構成でき、シンチレーション光を必要としない。TMS

は常温で液体、水素の数密度が大きいという利点を持つ。本研究ではさらに TMS の断面積のデータから検出器の見積もりを行った。検出器のサイズは 500MeV の中性子に対して 10[%]程度の検出効率を持たせると想定した場合、軸方向に衝突までに必要な長さが 0.6[m]、反跳陽子に変換されてから 0.9[m]が必要になる。またこのとき動経方向に 0.3[m]が必要になることが想定されることがわかった。しかしながら、高エネルギー中性子の衝突で起こりうるカスケード散乱の影響が考慮されておらず、大きな不定性を持つ。また、電離電子をドリフトさせる技術についても未確認である。今後、この点に焦点を絞り、研究を行っていく予定である。

7 . 参考文献

[1]Satoshi CHIBA et. al: Evaluation of Neutron Cross Sections of Hydrogen from 20MeV to 1GeV, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 33, No. 8, p. 654-662