

陽子と G10_FR4、CFRP その他の物質との相互作用

Y. Satou

August 2, 2024

Abstract

陽子がプラスチックシンチレータ、炭素、エポキシ、G10_FR4、CFRP 等を通過する際のエネルギー損失、クーロン多重散乱、エネルギーストラグリング、及び、これらの物質中での飛程を求めた。利用可能な複数のコードで計算を実施し、結果の相互の一致の度合いを確認した。

1 はじめに

幾つかの物質を通過する際の陽子のエネルギー損失、クーロン多重散乱、及びエネルギーストラグリングの効果を複数のコードを用いて評価した。また、これらの物質中での飛程の評価も行った。

用いた Fortran code は IELOS (INTENSITY の緒サブルーチンを援用したエネルギー損失計算コード)、ELOS (RANGELBL の rdedx サブルーチンを援用したエネルギー損失計算コード)、RANGELBL である。その他、NIST(National Institute of Standards and Technology) の pstar [1]、LISE 等も適宜 (考慮した物質が登録されている場合) 利用した。

2 エポキシ、G10_FR4、CFRP 等の各種物質のエネルギー損失等の計算に必要なパラメータ

今回考慮した物質と、荷電粒子との電磁相互作用を規定する緒パラメータを表 1 にまとめる。 $\langle Z/A \rangle$ は $\langle Z/A \rangle = Z_{\text{eff}}/A_{\text{eff}}$ とした。ここで Z_{eff} と A_{eff} は Leo [2] の、それぞれ、式 (2.40) と式 (2.41) で与えられるものとする。表 1 中の $\langle A \rangle_{\text{mf}}$ と $\langle Z \rangle_{\text{mf}}$ は、それぞれ、質量分率 (w_i : mass fraction) の重み付き平均、 $\langle A \rangle_{\text{mf}} = \sum w_i A_i$ と $\langle Z \rangle_{\text{mf}} = \sum w_i Z_i$ 、で求めた。ここで、各元素の質量分率は Leo [2] の式 (2.39) で与えられる。表 1 中の $\langle A \rangle^*$ は $\langle A \rangle^* = \langle Z \rangle_{\text{mf}} / \langle Z/A \rangle$ で算出した。

表 1 中の $\langle A \rangle_{\text{af}}$ と $\langle Z \rangle_{\text{af}}$ は、それぞれ、元素毎の (相対) 原子数 (a_i : number of atoms) の重み付き平均、 $\langle A \rangle_{\text{af}} = \sum a_i A_i / \sum a_i (= A_{\text{eff}} / \sum a_i)$ と $\langle Z \rangle_{\text{af}} = \sum a_i Z_i / \sum a_i (= Z_{\text{eff}} / \sum a_i)$ 、で求めた。

ここでは、 $\langle A \rangle_{\text{af}}$ と $\langle Z \rangle_{\text{af}}$ の値を収めた物質ファイルをデフォルトファイル、 $\langle A \rangle^*$ と $\langle Z \rangle_{\text{mf}}$ の値を収めた物質ファイルをオルタナティブファイル (alt file) として、物質ファイルに区別を設けた。デフォルトファイルとオルタナティブファイルの計算結

果は、エネルギー損失、Particle Data Handbook と PDG の方法に基づくクーロン多重散乱、及び、エネルギーストラグリングに於いて本質的な変わりは無かった。一方で、Anne-1988 の方法 [3] に基づくクーロン多重散乱の計算結果が両者で比較的顕著に異なった。デフォルトファイルの結果が LISE の計算結果と類似する傾向が、特に複合物質 (composite material) に於いて見受けられた。この観察から、今後、原子数分率 (atomic fraction) に基づいて平均化を行った $\langle A \rangle_{af}$ と $\langle Z \rangle_{af}$ を各種計算の基礎に据える (出発点とする) ことにする¹。

放射長 (radiation length X_0) は元素の質量分率を用いて、Leo [2] の式 (2.84) より求めた。

エポキシ (epoxy) の化学組成は、Tosello 氏の Web ページ [4] に記載のものを参考にした。PDG/LBL の Epotek-301-1 の質量分率の表 [5] は、窒素の分率が過小評価されている様に見受けられた。上述の Tosello 氏の Web ページ [4] の組成から独自に導いた関連緒パラメータを Web ページ [6] に示す。今回の計算では、平均イオン化ポテンシャルを除き、この表に記載の値を用いた。

G10_FR4 の化学組成は、Tosello 氏の Web ページ [7] に記載のものを参考にした。PDG/LBL の G10_FR4 の質量分率の表 [8] は、水素 (H)、炭素 (C)、窒素 (N) の質量分率が相互に入れ替わっている様に見受けられた (これに加え、上述のエポキシの組成における窒素の分率の過小評価が加わる)。Tosello 氏の Web ページ [7] の組成から独自に導いた関連緒パラメータを Web ページ [9] に示す。今回の計算では、この表に記載の値を用いた。

CFRP の化学組成は、Tosello 氏の Web ページ [10] に記載のものを参考にした。すなわち、炭素繊維とエポキシ (Epotek 301-1) の質量混合比として 0.706535 : 0.293465 を仮定した。また、エポキシと炭素の平均イオン化ポテンシャルとして、それぞれ、76.7 eV [5] と 81.0 eV [11] を採用した。これらの前提のもとで計算される、関連する Atomic & Nuclear 特性を表 2 に示す。また、関連元素の質量分率と (相対) 原子数を表 3 に示す。

炭素繊維とエポキシの混合比が他の場合の評価結果を補遺 A に示す。

3 エネルギー損失の計算結果

厚さ 10 mm のプラスチックシンチレータ (Polyvinyltoluene) 中でのエネルギー損失の、入射陽子のエネルギー (MeV/u) 依存性の計算結果を図 1 に示す。INTENSITY (plastic) (赤実線)、INTENSITY (C₉H₁₀) (青波線)、elos (緑点線)、及び LISE (黒塗り点) の計算結果は相互に良く一致する。

厚さ 2.4 mm の炭素 (密度 1.8 g/cm³)、エポキシ、G10_FR4、及び CFRP に対する陽子のエネルギー損失の入射エネルギー依存性の計算結果を、それぞれ、図 2、図 3、図 4、及び図 5 に示す。INTENSITY、elos、及び LISE (G10_FR4 と CFRP を除く) の計算結果は、陽子エネルギーが 30 MeV 以上で良く一致する。

厚さ 100 μm の銅に対する陽子のエネルギー損失の入射エネルギー依存性の計算結果を図 6 に示す。三つのコードの結果の一致の度合いは良い。

¹尚、この方法は ENEW に於いても採用されている様である

Table 1: エネルギー損失の計算に用いる各物質の物理化学定数。

物質	ファイル名	$\langle A \rangle$		$\langle Z/A \rangle$	密度 (g/cm ³)	固体 (0) or 気体 (1)	η	I (eV)	X_0 (mg/cm ²)
		$\langle A \rangle_{\text{af}}$	$\langle A \rangle_{\text{mf}}$						
Polyvinyltoluene	plastic.dat	6.23024	11.07547	3.37316	1.032	0	1.0	64.7	43900.0
	plastic_alt.dat	10.29704	5.57500	0.54142	1.032	0	1.0	64.7	43910.0
C ₉ H ₁₀	C9H10.dat	6.21981	11.07221	3.36842	1.032	0	1.0	64.7	43910.0
	C9H10_alt.dat	10.29153	5.57352	0.54156	1.032	0	1.0	64.7	43910.0
炭素 (1.8 g/cm ³)	C_1.8.dat	12.01070	6.00000	0.49954	1.800	0	1.0	78.0	42700.0
	epoxy.dat	6.37915	11.89896	3.45659	1.190	0	1.0	76.7	41710.0
Epoxy (Epotek 301-1)	epoxy_alt.dat	11.05139	5.98828	0.54186	1.190	0	1.0	76.7	41710.0
	G10_FR4.dat	10.90206	18.94140	5.61071	1.800	0	1.0	110.40	30180.0
G10-FR4	G10_FR4_alt.dat	18.32866	9.43278	0.51465	1.800	0	1.0	110.40	30180.0
	CH2.dat	4.67557	10.42933	2.66667	0.940	0	1.0	57.4	44770.0
CH ₂	CH2_alt.dat	9.26003	5.28137	0.57034	0.940	0	1.0	57.4	44770.0
	Water.dat	6.00500	14.32141	3.33333	1.000	0	1.0	75.0	36080.0
H ₂ O	Water_alt.dat	13.00080	7.21665	0.55509	1.000	0	1.0	75.0	36080.0
	Cu.dat	63.54600	29.00000	0.45636	8.960	0	1.0	322.0	12860.0
CFRP (M55J/EU334) [10]	CFRP.dat	9.53932	11.97791	4.88384	1.630	0	1.0	79.64	42400.0
	CFRP_alt.dat	11.71274	5.99656	0.51197	1.630	0	1.0	79.64	42400.0
CFRP [13]	CFRP2.dat	9.33296	11.97439	4.79064	1.630	0	1.0	79.50	42370.0
	CFRP2_alt.dat	11.68158	5.99619	0.51330	1.630	0	1.0	79.50	42370.0

Table 2: CFRP (M55J/EU334) [10] の Atomic & Nuclear 特性。

Quantity	Value	Units	Misc.
$\langle Z/A \rangle$	0.51197	mol g ⁻¹	
Density	1.63	g cm ⁻³	
Mean excitation energy (I)	79.64	eV	76.7 eV for Epotek-301-1
Radiation length (X_0)	42.40	g cm ⁻²	

Table 3: CFRP (M55J/EU334) に含まれる元素の質量分率と (相対) 原子数。

Element	Z	Atomic number (Relative)	A	Mass fraction
O	8	0.140188	15.9990	0.055956
H	1	1.000000	1.00800	0.025148
C	6	3.031895	12.0107	0.908508
N	7	0.029725	14.0070	0.010388

4 クーロン多重散乱の計算結果

厚さ 10 mm のプラスチックシンチレータ (Polyvinyltoluene) 中でのクーロン多重散乱 (σ 値、plane) の、入射陽子のエネルギー (MeV/u) 依存性の計算結果を図 7 に示す。INTENSITY で計算される四通りの計算結果 (Particle Data Handbook (赤線)、Anne-1988 (青線)、PDG (緑線)、alt file を用いた Anne-1988 (青破線)) と LISE (黒点) の結果は、定性的には同様のエネルギー依存性を示す。

厚さ 2.4 mm のプラスチックシンチレータ、炭素 (密度 1.8 g/cm³)、CH₂、水 (H₂O)、エポキシ、G10_FR4、及び CFRP(M55J/EU334) に対する陽子のクーロン多重散乱の入射エネルギー依存性の計算結果を、それぞれ、図 8、図 9、図 10、図 11、図 12、図 13、及び図 14 に示す。厚さ 100 μ m の銅に対する陽子のクーロン多重散乱の入射エネルギー依存性の計算結果を図 15 に示す。各種のコード/モデルの結果の相互の一致は概ね良い。

クーロン多重散乱に関しては、特に複合物質について、比較的ではあるが、Anne-1988 (青線) と LISE (黒点) の結果が良く一致する傾向が見られた。

5 エネルギーストラグリングの計算結果

厚さ 10 mm のプラスチックシンチレータ (Polyvinyltoluene) 中でのエネルギーストラグリング (σ 値) の、入射陽子のエネルギー (MeV/u) 依存性の計算結果を図 16 に示す。INTENSITY で計算される二通りの計算結果 (Schmidt, Tschalar (赤線)、Ahlen, Bichsel (青線)) と LISE (黒点) の結果は定性的には同様のエネルギー依存性を示す。

厚さ 2.4 mm の炭素 (密度 1.8 g/cm³)、エポキシ、G10_FR4、及び CFRP に対するエネルギーストラグリングの入射エネルギー依存性の計算結果を、それぞれ、図 17、図 18、図 19、及び図 20 に示す。厚さ 100 μ m の銅に対する陽子のエネルギースト

ラグリングの入射エネルギー依存性の計算結果を図 21 に示す。各種のコード/モデルの結果の相互の一致は概ね良い。

6 飛程の計算結果

プラスチックシンチレータ (Polyvinyltoluene)、炭素 (密度 1.8 g/cm^3)、エポキシ、G10_FR4、CFRP、 CH_2 、水 (H_2O)、及び銅における陽子の飛程 – エネルギー曲線を、それぞれ、図 22、図 23、図 24、図 25、図 26、図 27、図 28、及び図 29 に示す。INTENSITY、NIST (エポキシ、G10_FR4、及び CFRP は除く)、RANGELBL、及び LISE (G10_FR4 と CFRP は除く) の計算結果は相互に非常に良く一致する。 CH_2 と水 (H_2O) に対する計算は、化合物に対する計算の参照目的の為になされた。

図 30 と図 31 に、それぞれ、プラスチックシンチレータと炭素 (1.8 g/cm^3) の陽子に対する飛程 – エネルギー曲線の低エネルギー領域 (陽子エネルギーが 70 MeV/u 以下) における拡大図を示す。複数の方法に基づく計算結果は互いに良く一致する。尚、INTENSITY を用いた計算では、設定される限界値以下のエネルギーの陽子の飛程への寄与は E.V. Benton & R.P. Henke の方法 [12] を用いて評価されるが、ここでは限界値は 20 MeV/u に設定された。

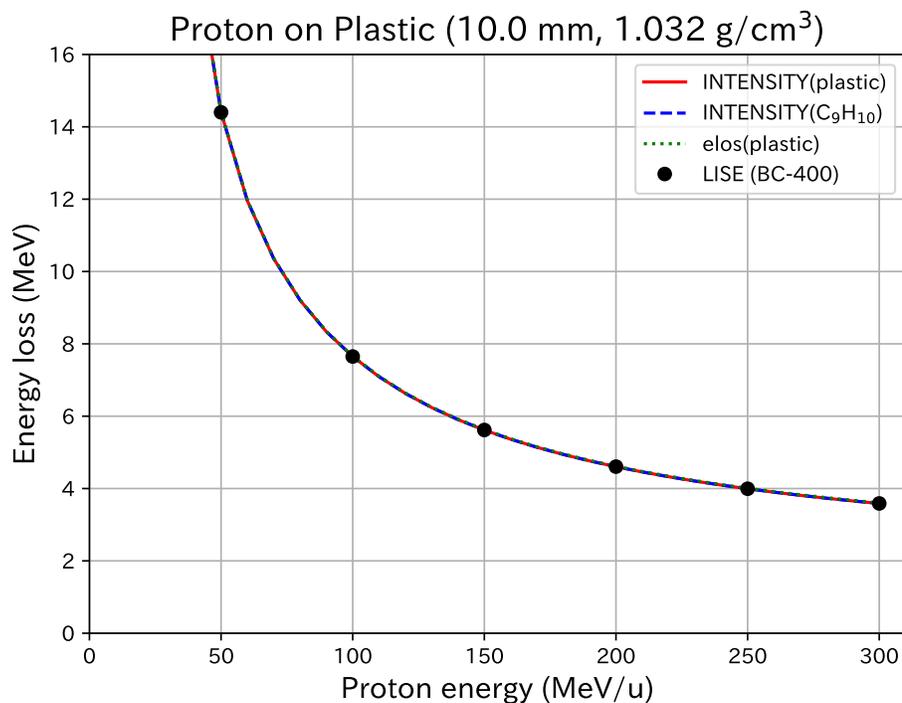


Figure 1: 厚さ 10 mm のプラスチックシンチレータ中での陽子のエネルギー損失の入射エネルギー依存性。

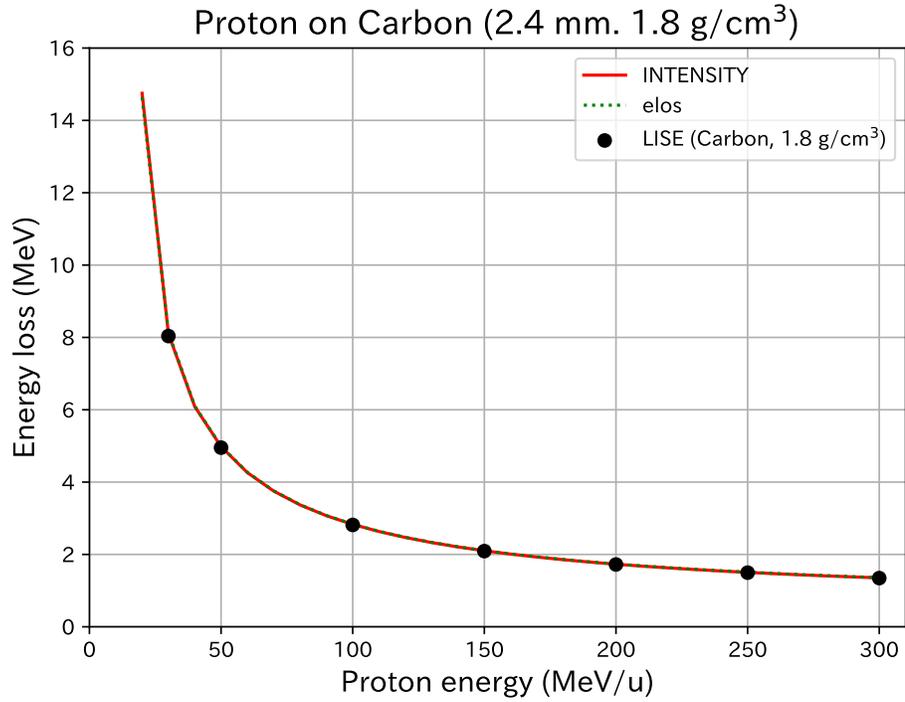


Figure 2: 厚さ 2.4 mm の炭素 (密度 1.8 g/cm³) 中での陽子のエネルギー損失の入射エネルギー依存性。

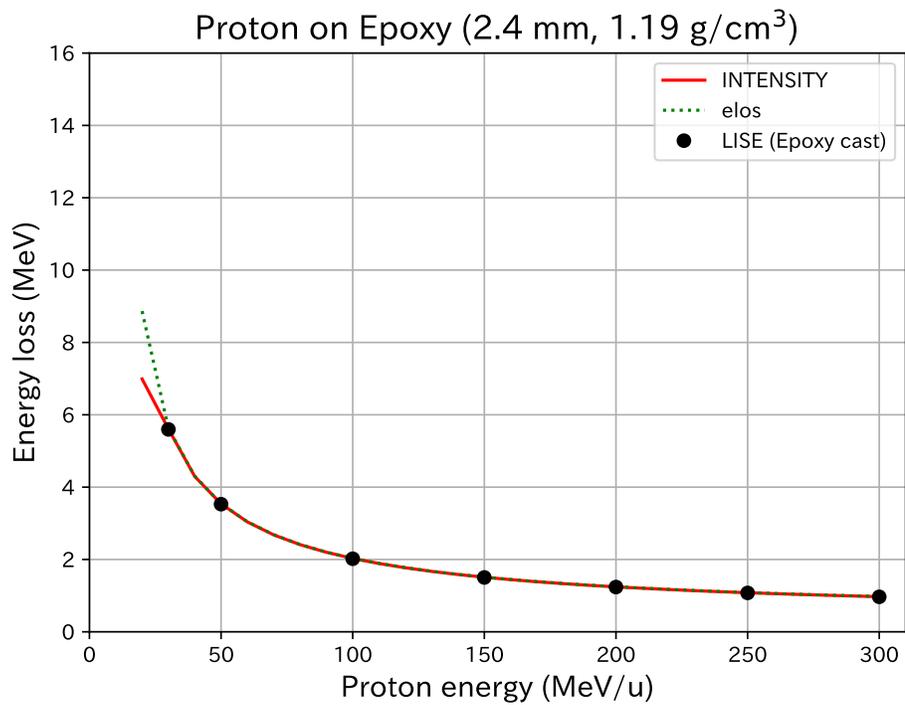


Figure 3: 厚さ 2.4 mm のエポキシ中での陽子のエネルギー損失の入射エネルギー依存性。

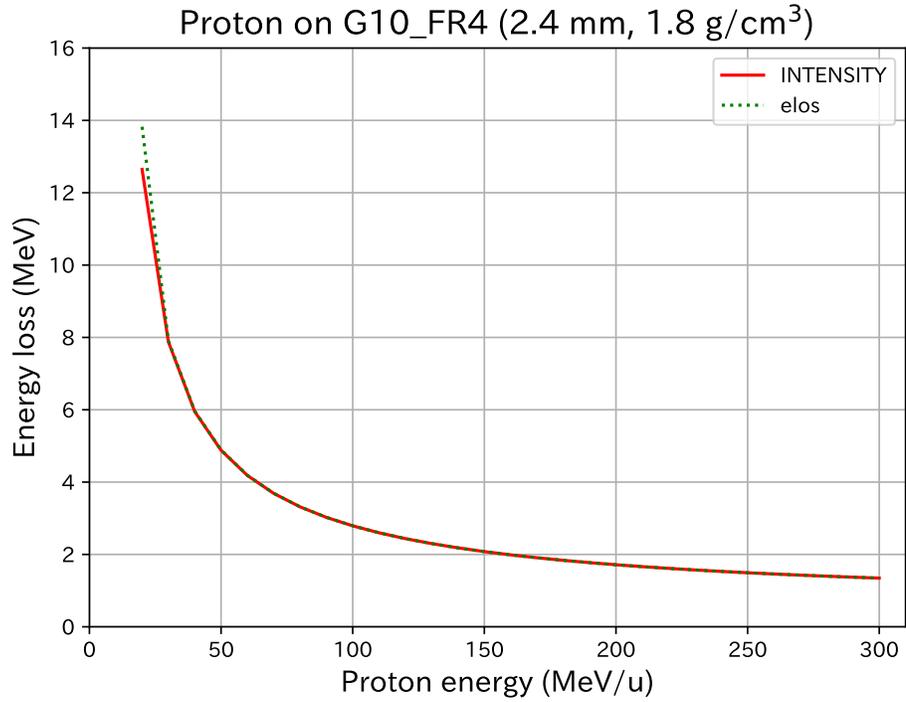


Figure 4: 厚さ 2.4 mm の G10_FR4 中の陽子のエネルギー損失の入射エネルギー依存性。

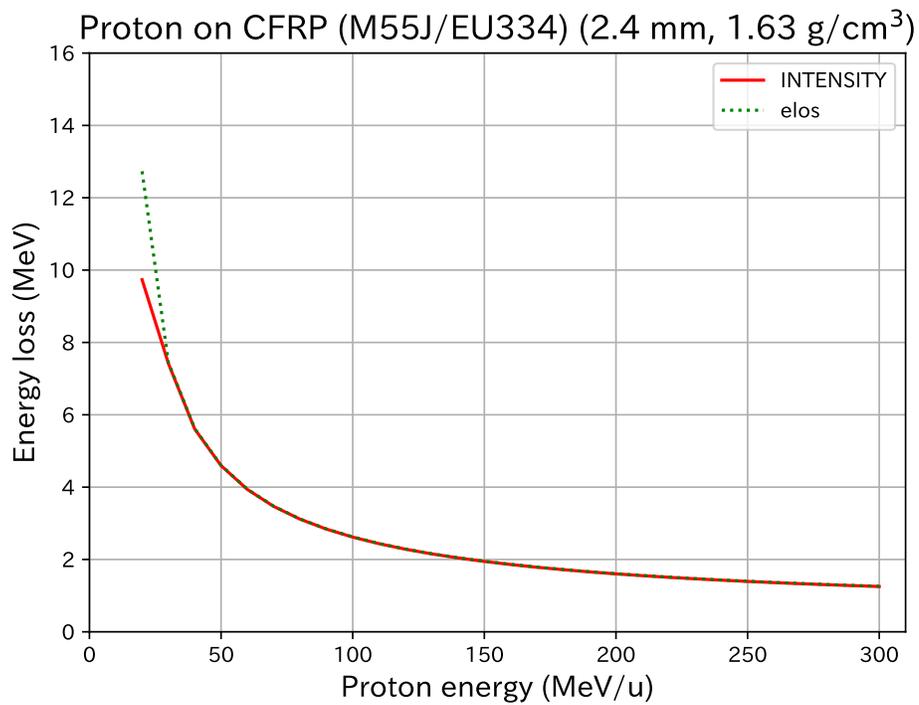


Figure 5: 厚さ 2.4 mm の CFRP 中の陽子のエネルギー損失の入射エネルギー依存性。

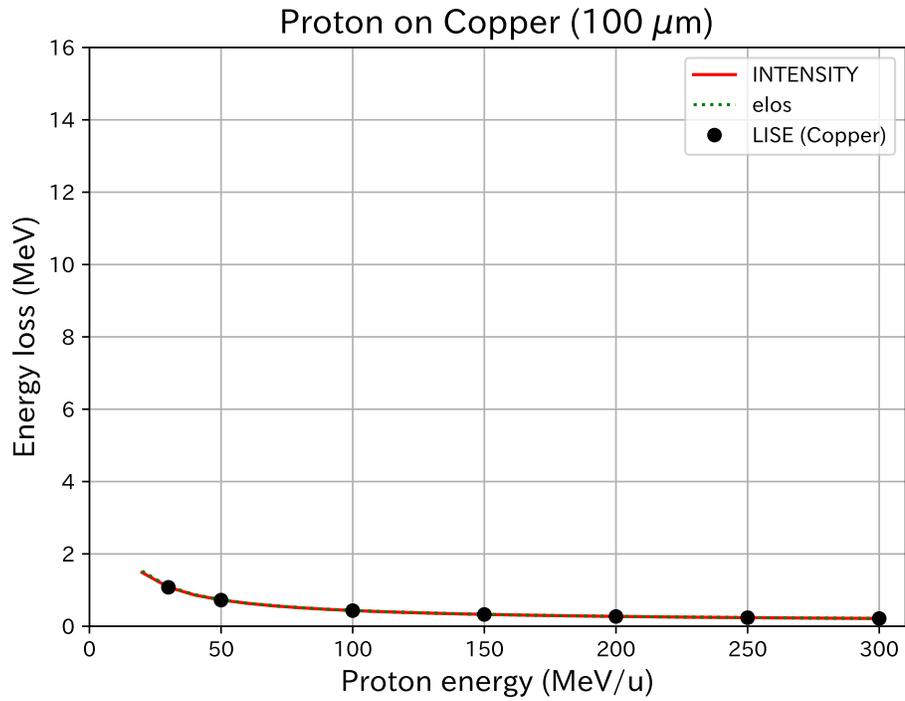


Figure 6: 厚さ 100 μm の銅中での陽子のエネルギー損失の入射エネルギー依存性。

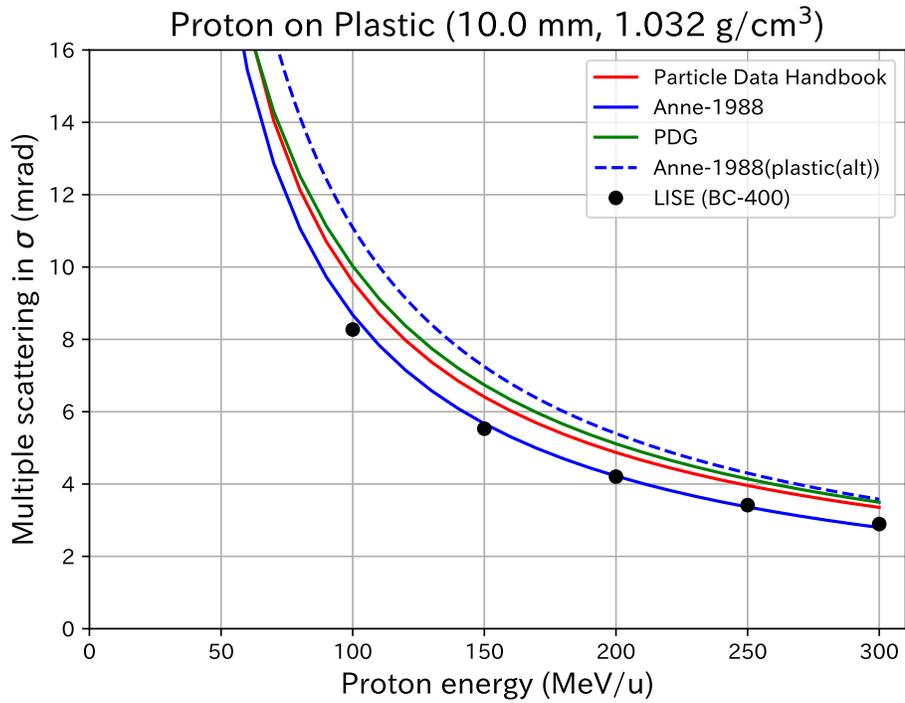


Figure 7: 厚さ 10 mm のプラスチック中での陽子のクーロン多重散乱の入射エネルギー依存性。

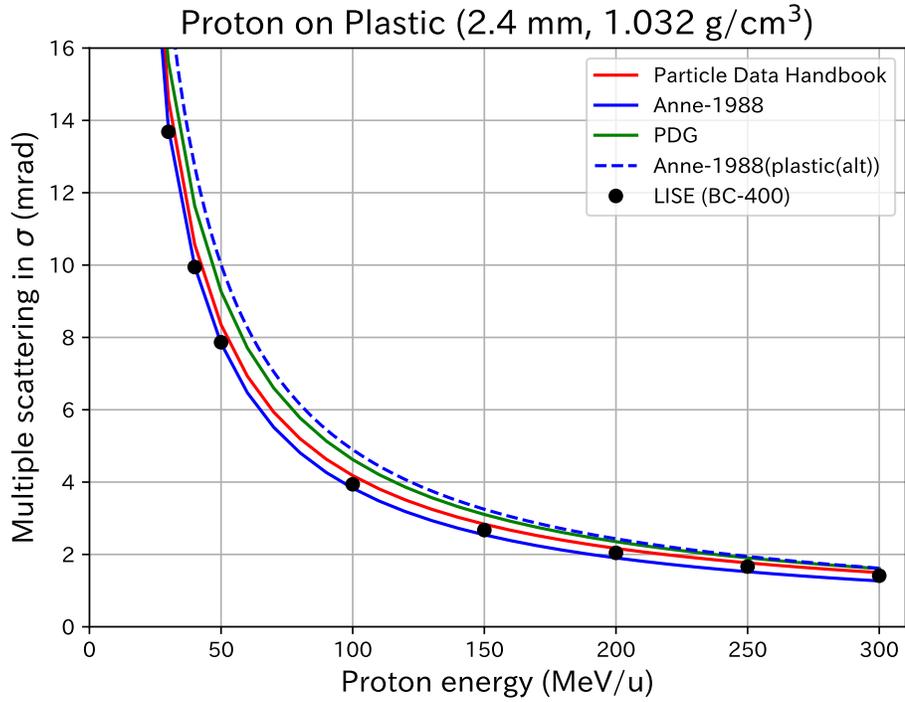


Figure 8: 厚さ 2.4 mm のプラスチック中での陽子のクーロン多重散乱の入射エネルギー依存性。

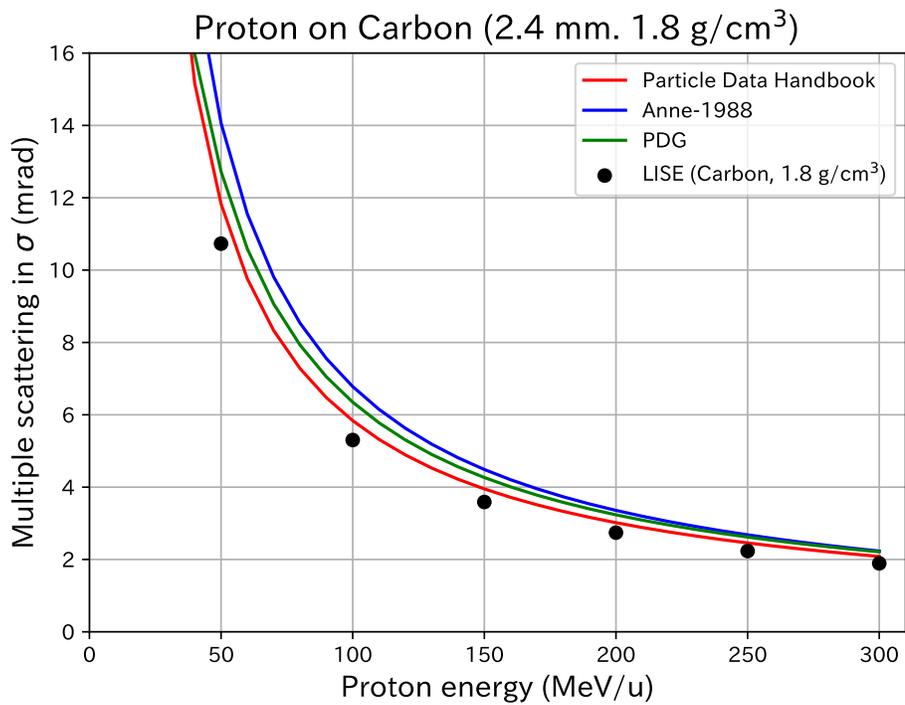


Figure 9: 厚さ 2.4 mm の炭素 (1.8 g/cm³) 中での陽子のクーロン多重散乱の入射エネルギー依存性。

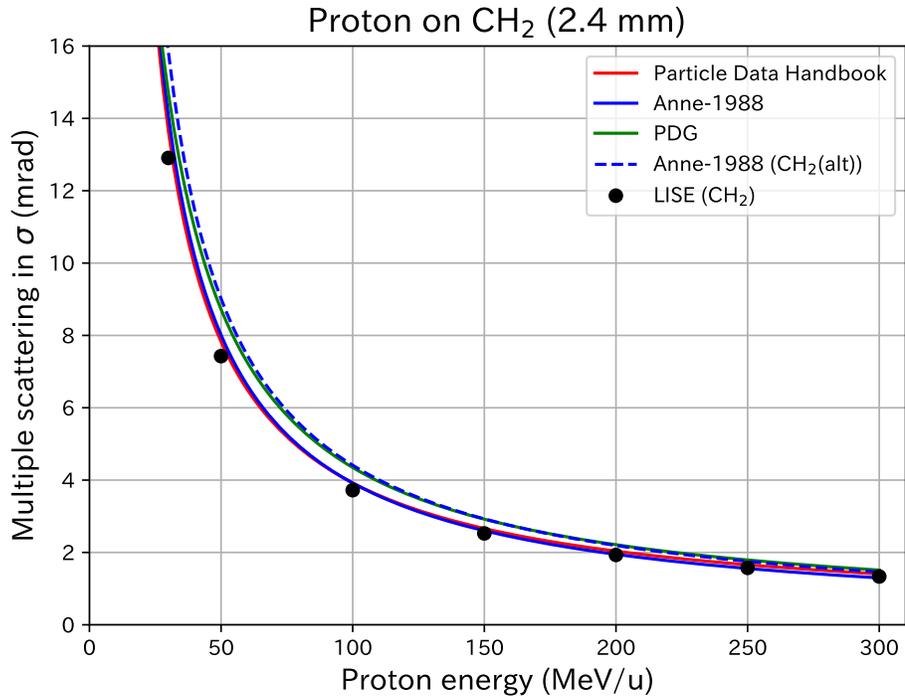


Figure 10: 厚さ 2.4 mm の CH₂ 中での陽子のクーロン多重散乱の入射エネルギー依存性。

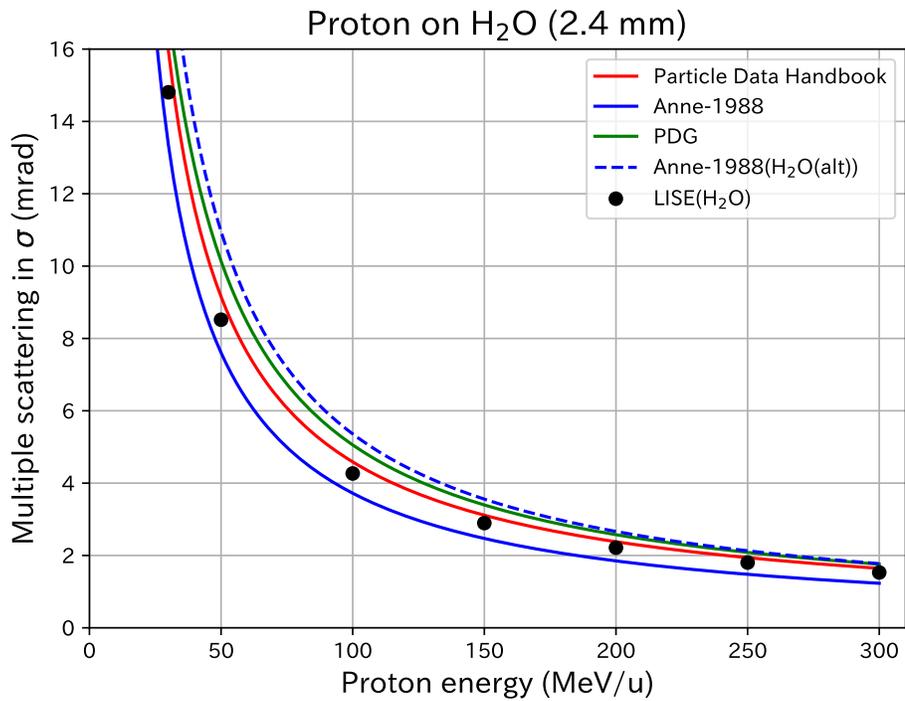


Figure 11: 厚さ 2.4 mm の水 (H₂O) 中での陽子のクーロン多重散乱の入射エネルギー依存性。

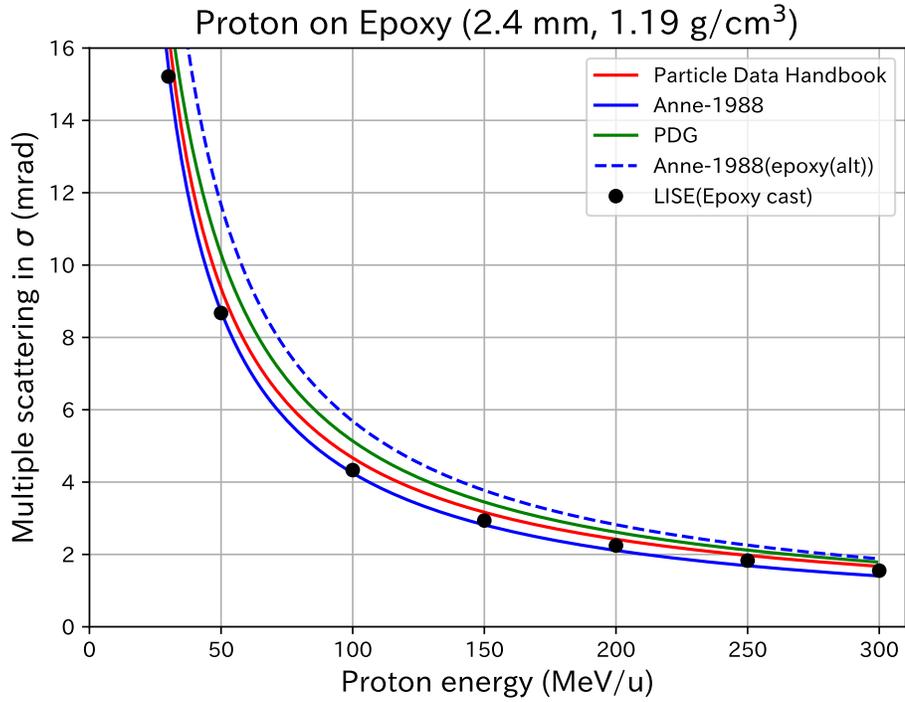


Figure 12: 厚さ 2.4 mm のエポキシ中での陽子のクーロン多重散乱の入射エネルギー依存性。

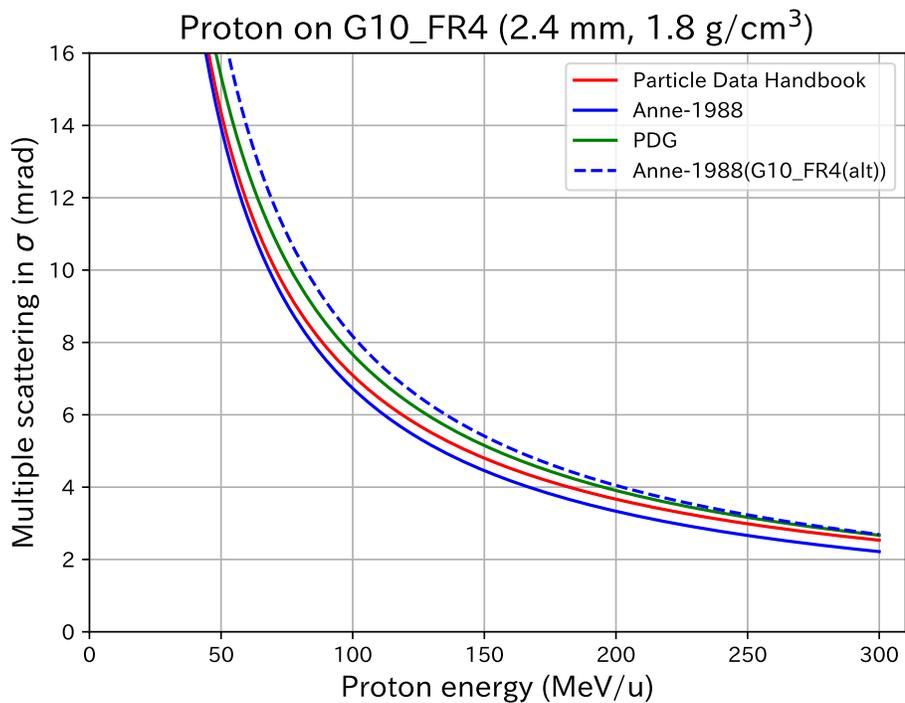


Figure 13: 厚さ 2.4 mm の G10_FR4 中での陽子のクーロン多重散乱の入射エネルギー依存性。

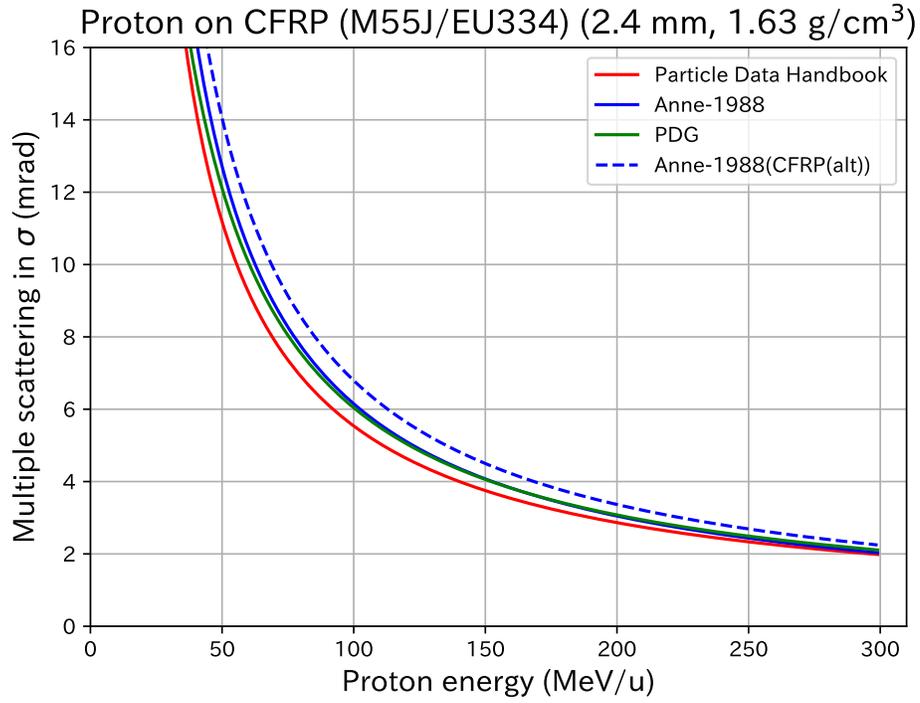


Figure 14: 厚さ 2.4 mm の CFRP 中での陽子のクーロン多重散乱の入射エネルギー依存性。

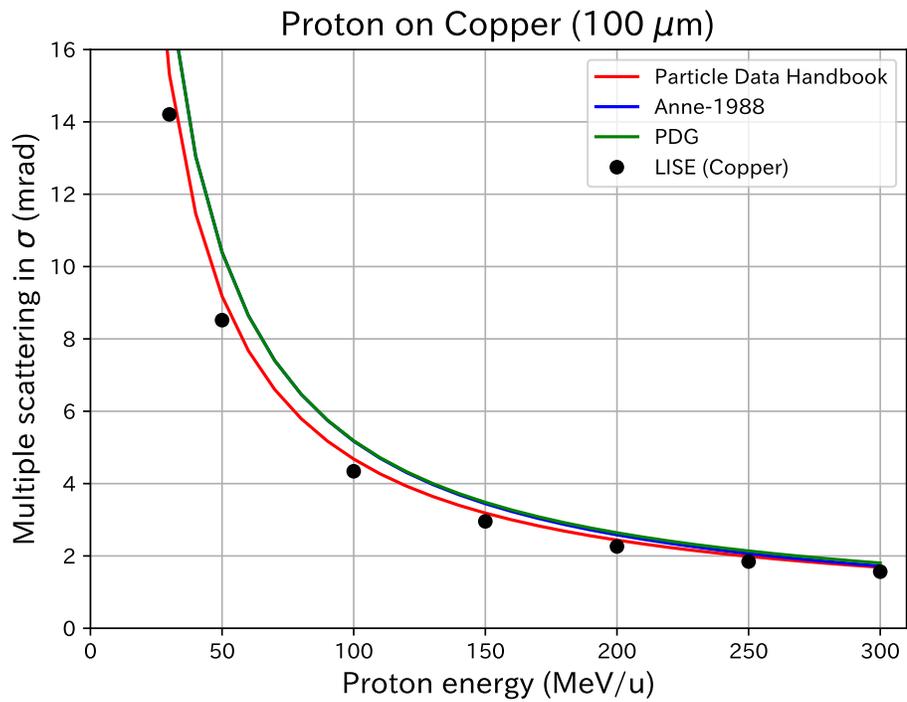


Figure 15: 厚さ 100 μm の銅中での陽子のクーロン多重散乱の入射エネルギー依存性。

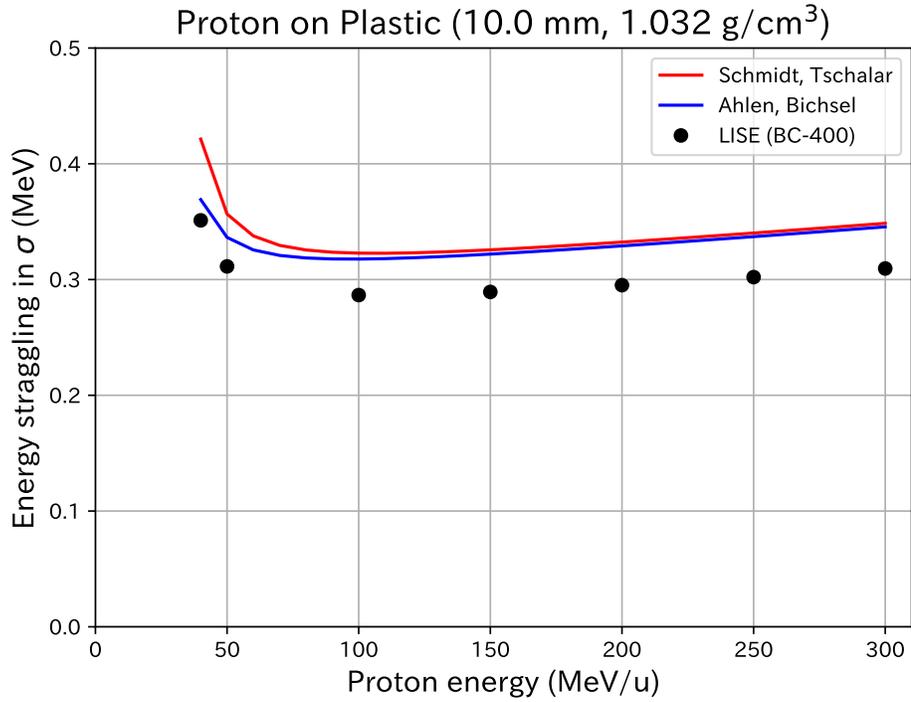


Figure 16: 厚さ 10 mm のプラスチック中での陽子のエネルギーストラグリングの入射エネルギー依存性。

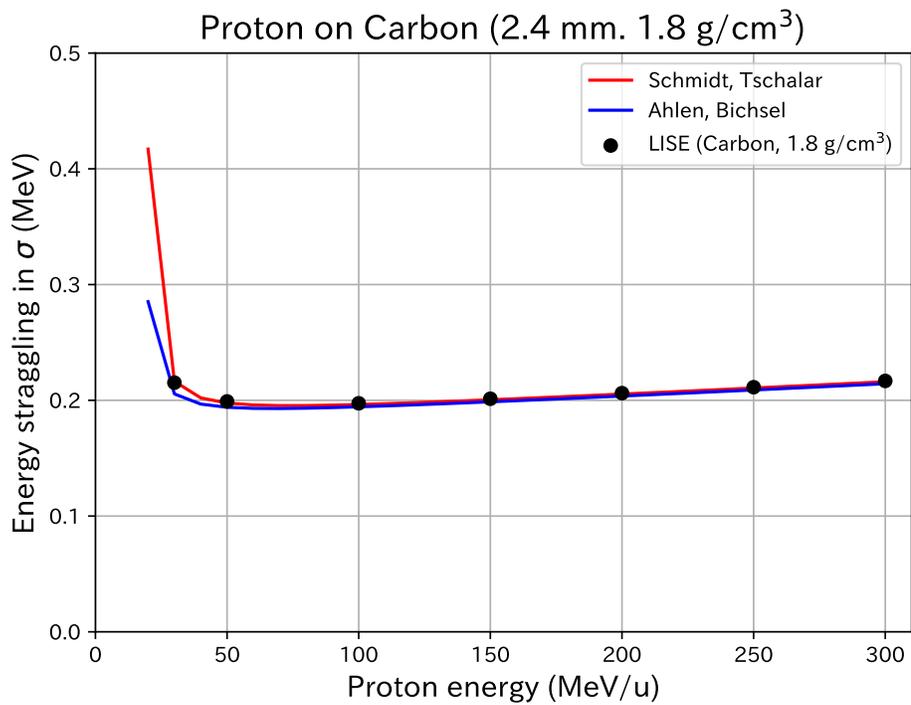


Figure 17: 厚さ 2.4 mm の炭素 (1.8 g/cm³) 中での陽子のエネルギーストラグリングの入射エネルギー依存性。

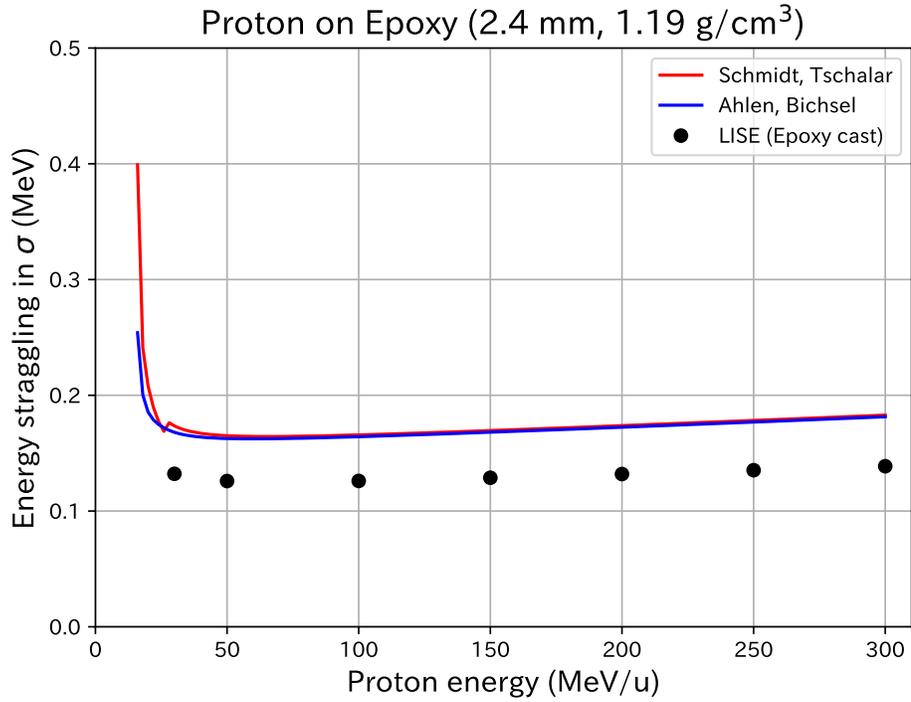


Figure 18: 厚さ 2.4 mm のエポキシ中での陽子のエネルギーストラグリングの入射エネルギー依存性。

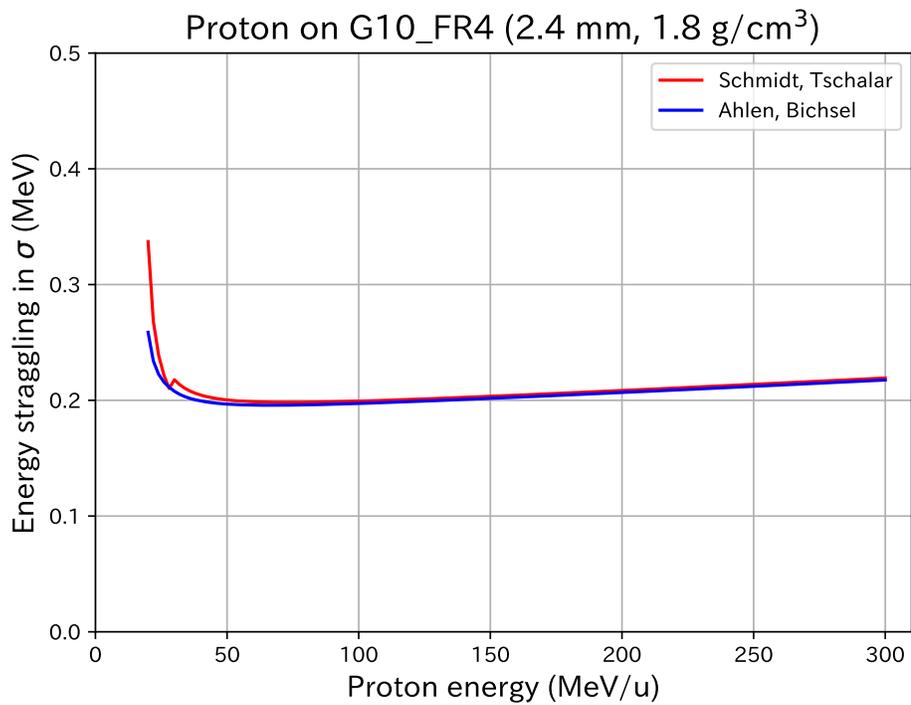


Figure 19: 厚さ 2.4 mm の G10_FR4 中での陽子のエネルギーストラグリングの入射エネルギー依存性。

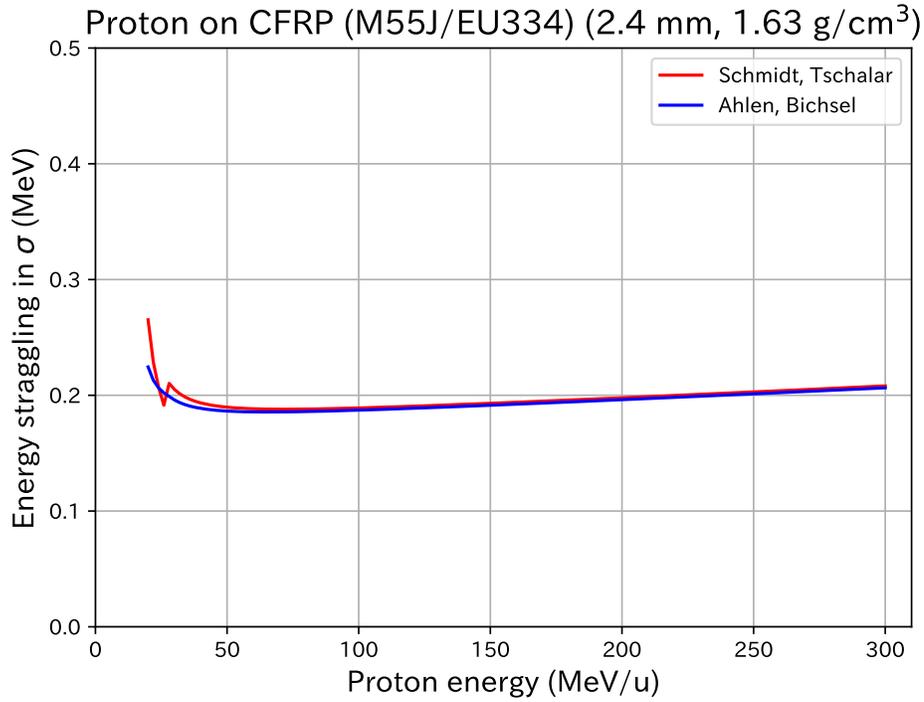


Figure 20: 厚さ 2.4 mm の CFRP 中での陽子のエネルギーストラグリングの入射エネルギー依存性。

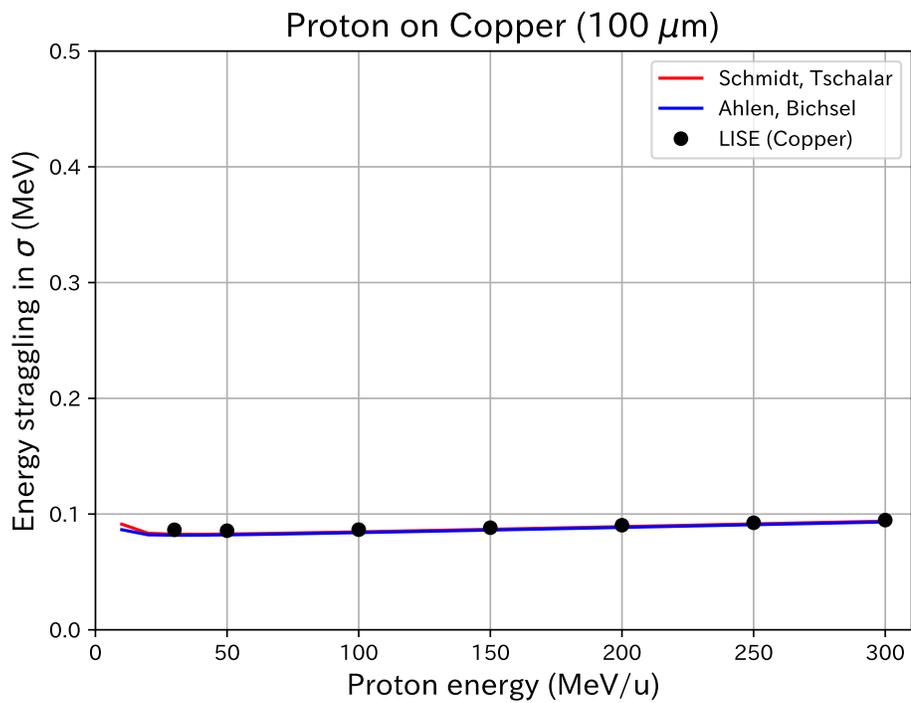


Figure 21: 厚さ 100 μm の銅中での陽子のエネルギーストラグリングの入射エネルギー依存性。

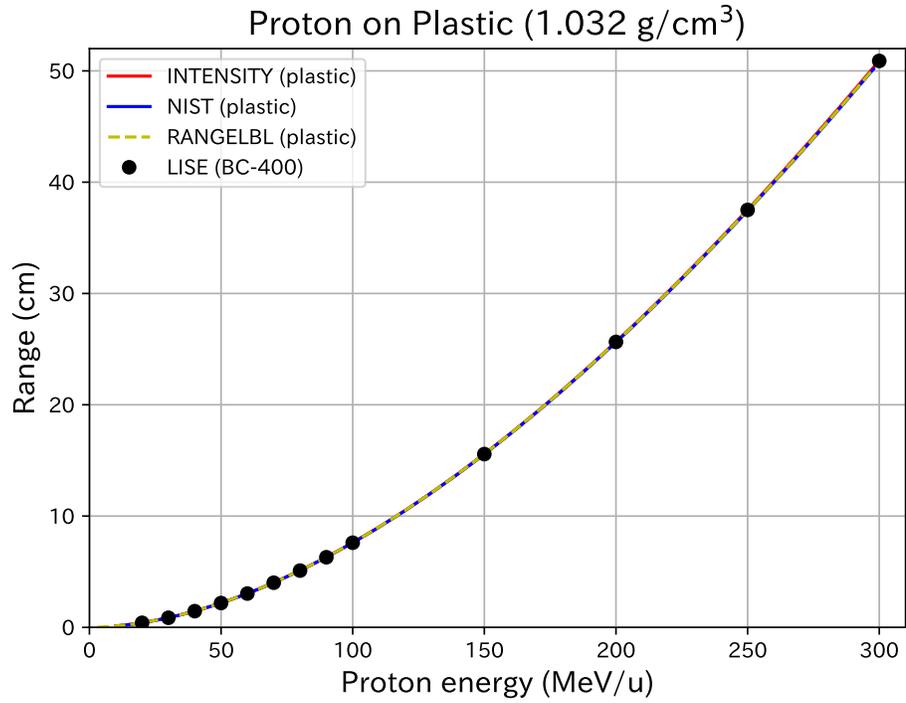


Figure 22: プラスチックシンチレータ (Polyvinyltoluene) 中での陽子の飛程の入射エネルギー依存性。

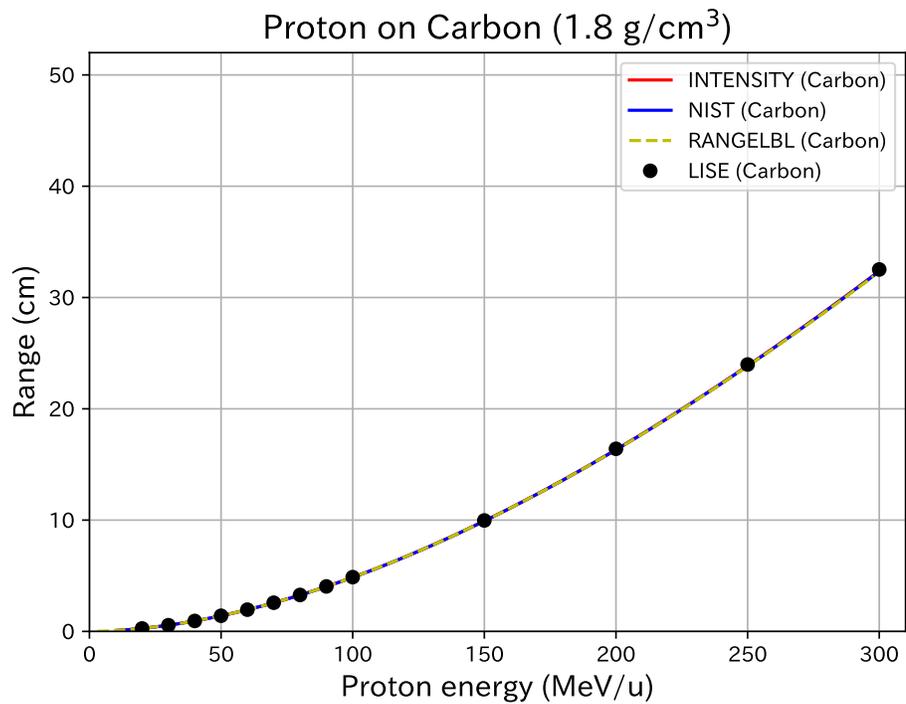


Figure 23: 炭素 (密度 1.8 g/cm³) における陽子の飛程 - エネルギー曲線。

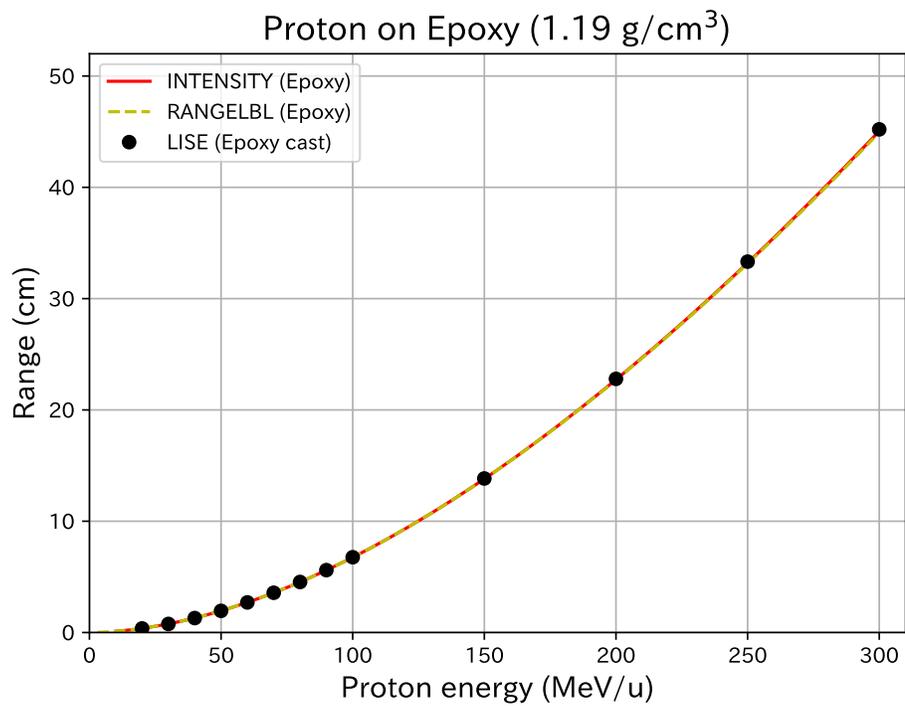


Figure 24: エポキシにおける陽子の飛程 – エネルギー曲線。

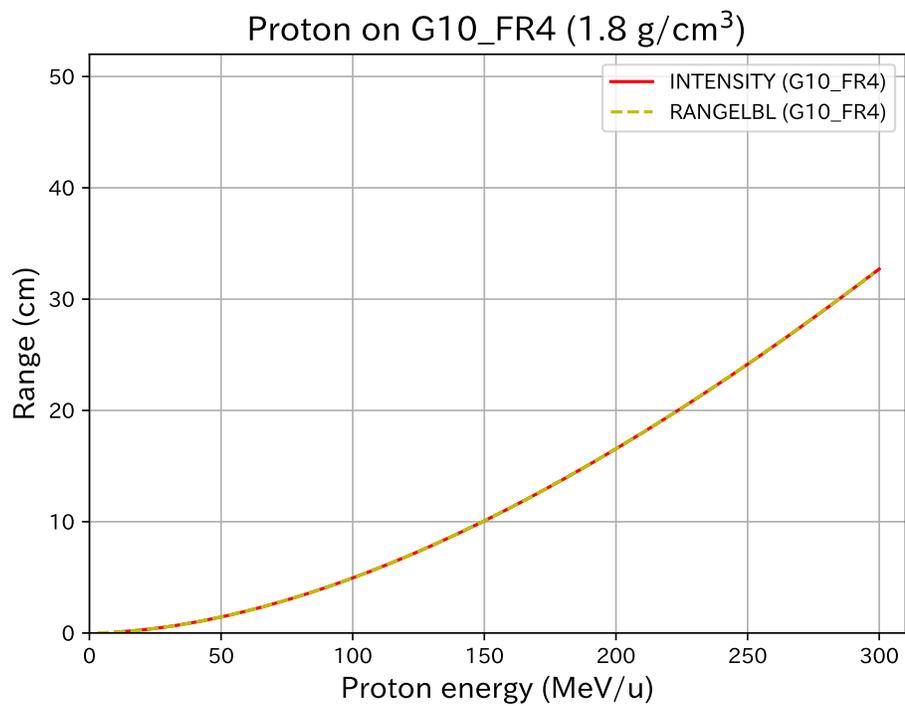


Figure 25: G10_FR4 における陽子の飛程 – エネルギー曲線。

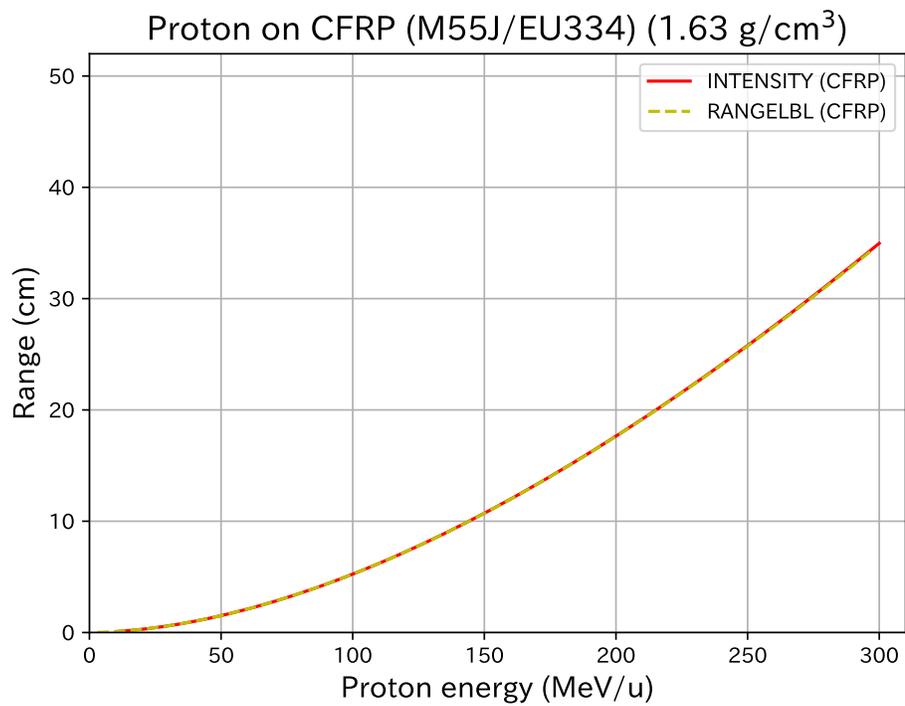


Figure 26: CFRP における陽子の飛程 – エネルギー曲線。

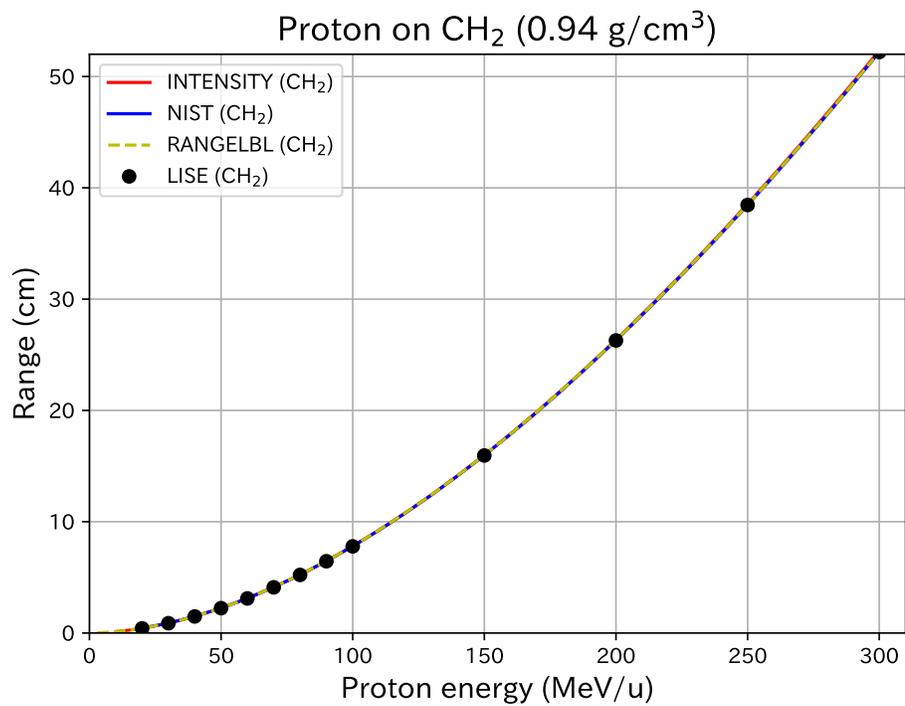


Figure 27: CH_2 における陽子の飛程 – エネルギー曲線。

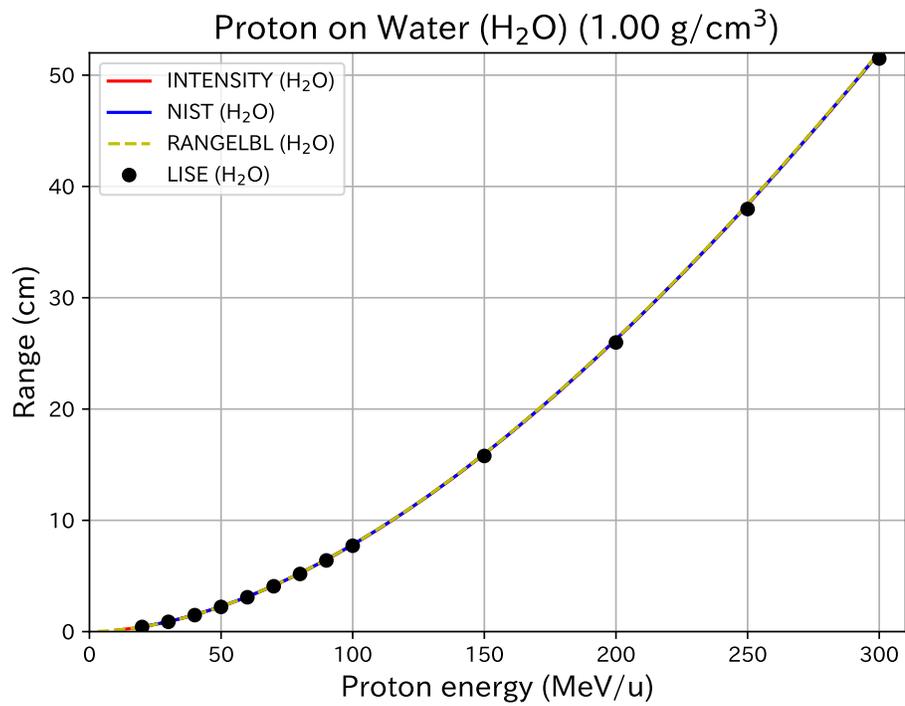


Figure 28: 水 (H₂O) における陽子の飛程 – エネルギー曲線。

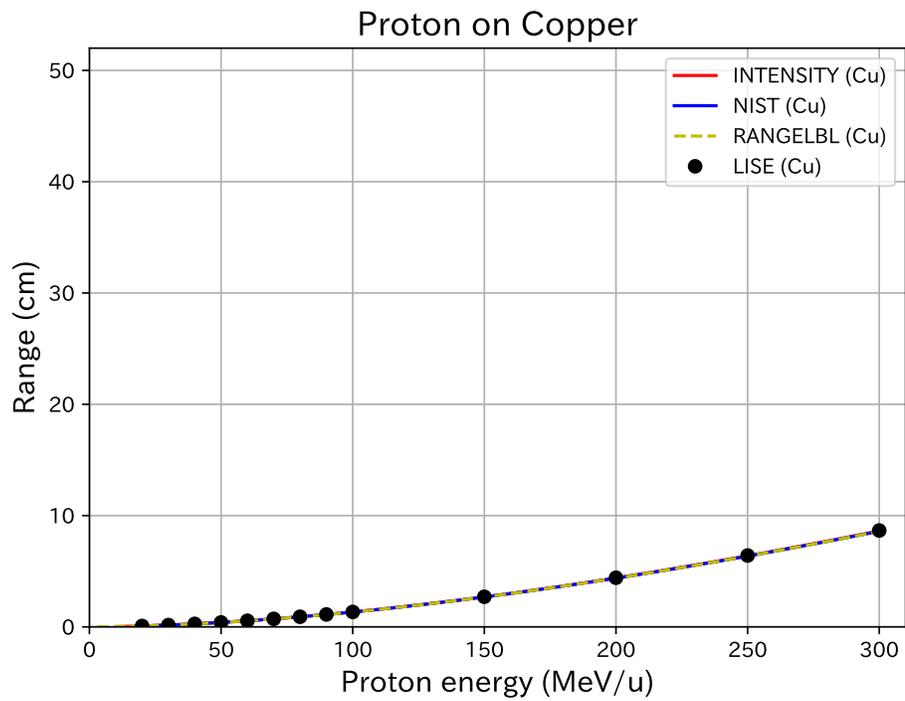


Figure 29: 銅における陽子の飛程 – エネルギー曲線。

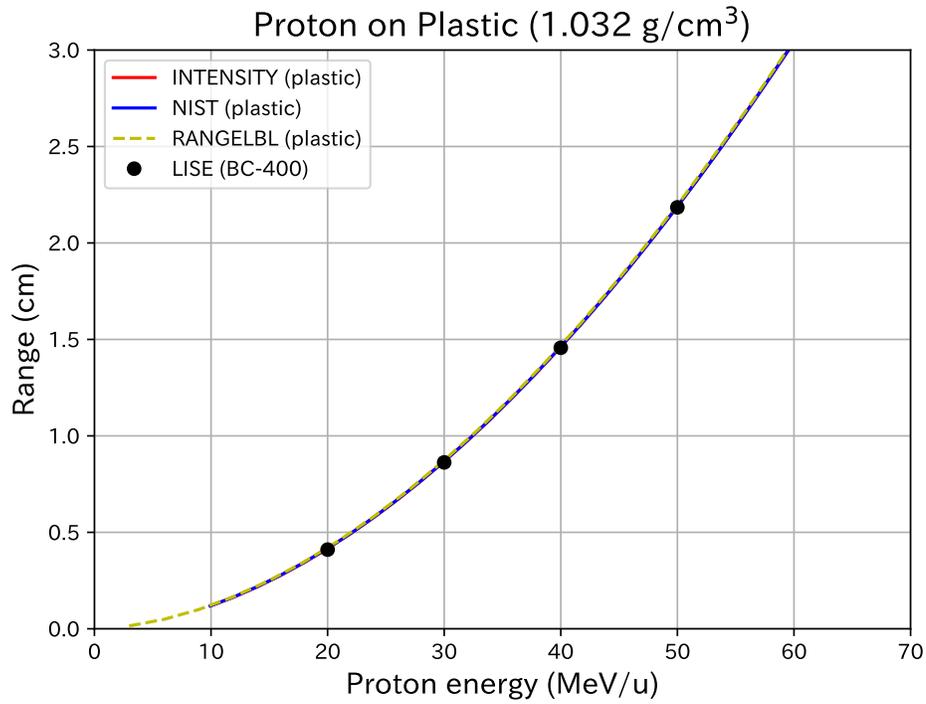


Figure 30: プラスチックにおける陽子の飛程 – エネルギー曲線。低エネルギー領域の拡大図。

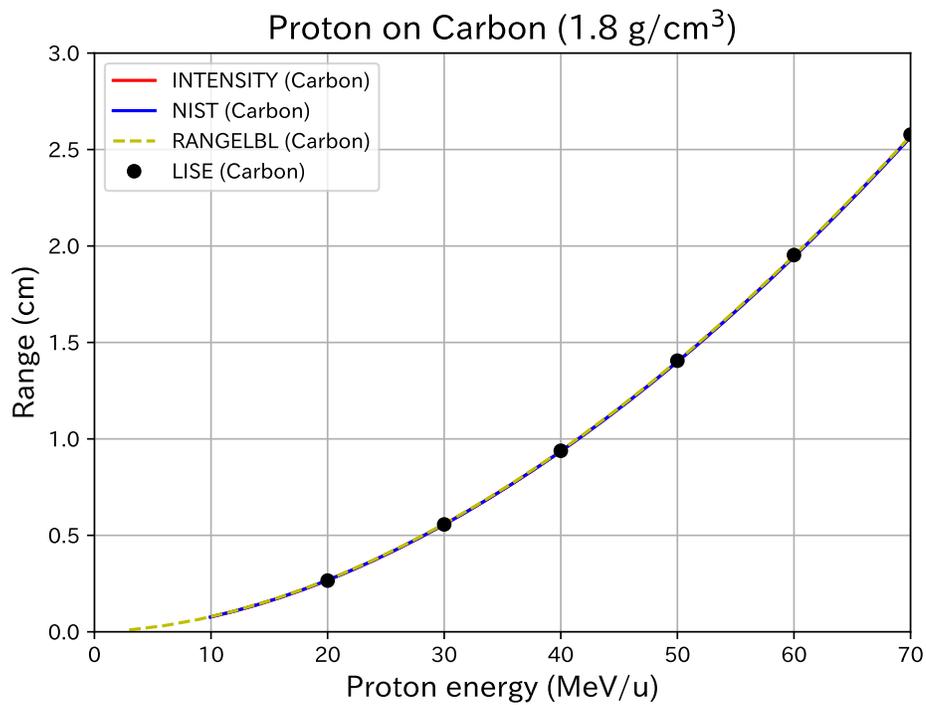


Figure 31: 炭素 (1.8 g/cm³) における陽子の飛程 – エネルギー曲線。低エネルギー領域の拡大図。

A 炭素繊維とエポキシの混合比として他の値を想定した場合の CFRP の物理化学定数

CFRP における炭素繊維とエポキシの混合比としては、炭素繊維: 67~68%、エポキシ: 32~33% という情報もある (この混合比の製品が存在する) [13]。それぞれの中央値を取って (炭素繊維 67.5%、エポキシ 32.5%)、CFRP の特性を再計算した。得られた Atomic & Nuclear 特性を表 4 に、含有元素の質量分率と (相対) 原子数を表 5 に示す。

Table 4: 炭素繊維とエポキシの混合比について 0.675:0.325 [13] を想定した場合の、CFRP の Atomic & Nuclear 特性。

Quantity	Value	Units	Misc.
$\langle Z/A \rangle$		0.51330 mol g ⁻¹	
Density	1.63	g cm ⁻³	
Mean excitation energy (I)	79.50	eV	76.7 eV for Epotek-301-1
Radiation length (X_0)	42.37	g cm ⁻²	

Table 5: 炭素繊維とエポキシの混合比が 0.675:0.325 [13] の CFRP に含まれる元素の質量分率と (相対) 原子数。

Element	Z	Atomic number (Relative)	A	Mass fraction
O	8	0.140188	15.9990	0.061969
H	1	1.000000	1.00800	0.027851
C	6	2.708081	12.0107	0.898676
N	7	0.029725	14.0070	0.011504

References

- [1] [NIST-PSTAR: stopping-power and range tables for protons.](#)
- [2] William R. Leo "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments" Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH (1994).
- [3] R. Anne, J. Herault, R. Bimbot, H. Gauvin, G. Bastin, F. Hubert, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B34 (1988) 295.
- [4] [SDD Materials : Epoxy resin Epotek 301-1.](#)
- [5] [Atomic and nuclear properties of Epotek-301-1.](#)

- [6] Some of atomic and nuclear properties of Epotek-301-1 (TITech).
- [7] SDD Materials : G10-FR4.
- [8] Atomic and nuclear properties of G10.
- [9] Some of atomic and nuclear properties of G10 (Full components for E_Glass) (TITech).
- [10] SDD Materials : M55J/EU334.
- [11] Update to ESTAR, PSTAR, and ASTAR Databases.
- [12] E.V. Benton and R.P. Henke, Nuclear Instruments and Methods 67 (1969) 87.
- [13] D. Yanagawa (HAYASHI REPIC), private communication.