

3.3 電子に対する線量計算

Dose Calculation for Electrons

平山 英夫

Hideo Hirayama

高エネルギー物理学研究所

National Laboratory for High Energy Physics

1 はじめに

ICRP/ICRU の合同作業グループは、放射線防護関連のデータについて調べる事により ICRP Publication 51 を見直す作業を進めている。中性子、光子及び電子については、1990 年勧告を取り入れるためには、一連の計算を行う事が求められていた。この内電子については、EURADOS WG 4 (Numerical Dosimetry) が 1992 年 6 月 PTB Braunschweig で開いた会合で計算すべきデータを整理し、責任者の Dr. J. L. Chartier から、電子輸送モンテカルロ計算を引き受けてもらえそうな研究者に質問・要請が出された。原研の山口氏を通じて著者にも要請があり、電子輸送計算に関して様々な計算コード間の相互比較を行う良い機会として要請された計算を行った。

2 計算することを要請された内容

WG から計算することを要請された内容は、真空中に置かれた平板ファントム (30cm × 15cm × 15cm で、材質としては、PMMA[1], 水と ICRU 4-element tissue (tissue)[2]) に、平行電子ビームが、角度 α で入射した時の、深さ d mm での吸収線量である。PMMA は、密度が他の物質と異なるので、7, 300 と 1000 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ の深さについても計算が要求された。各ファントム材の組成と密度を第 1 表に示す。

Table 1. Elemental Weight Percent Abundance.

Element	ICRU 4-Element tissue	PMMA resist	Water
H	10.1	8.05	11.19
C	11.1	59.98	
N	2.6		
O	76.2	31.96	88.81
Density g cm^{-3}	1.0	1.19	1.0

電子のエネルギーとしては、50 keV から、10 MeV で、深さ、 d 、は、0.07, 3.0 と 10 mm とし、 $\Delta d = 0.01d$ 内の吸収エネルギーから、当該位置での吸収線量を計算する事が求められた。入

射角度 (α) は、 0° から 75° で、 15° おきの値が求められたが、角度依存を詳細に見るために、 85° と 89° も計算した。

3 計算

計算は、汎用電子・光子シャワー計算モンテカルロコード EGS4 [3] を使用して行った。EGS4 は、電子・光子輸送に関する主な反応を扱う事ができる。コンプトン散乱は、自由電子との散乱としてクライン・仁科の式を使用し、蛍光 X 線とオージェ電子は追跡せずに、発生場所で吸収されるとした。EGS4 では、電子の弾性散乱は、Molière の多重散乱モデルを用いてシュミレーションしている。エネルギー吸収を計算する領域が非常に薄い事を考慮し、吸収エネルギーを正確に計算するために、PRESTA アルゴリズム [4] を使用した。EGS4 で使用する物質のデータは、PEGS4 (Preprocessor for EGS4) で予め計算する必要がある。PEGS4 の使用にあたっては、ICRU 37[1] の阻止能と同じ阻止能となるように APRIM 及び EPSTAR オプションを用いた。ヒストリー数、計算に用いたカットオフエネルギーを第 2 表に示す。

水と PMMA の連続減衰飛程 (CSDA range) [1] を第 1 図に示す。図から明かな様に、例えば、60 keV 以下のエネルギーの電子は、0.07 mm の深さには到達しない。従って、このような状況では、0.07 mm でのエネルギー吸収は、電子によりファントム中で発生した制動輻射により生じる事になる。しかしながら、ファントムの様な低原子番号物質では、低エネルギー電子が制動輻射を発生する確率は小さいため、通常の計算方法では十分な統計精度を得る事が難しい。そこで、このような場合には、A. F. Bielajew が作成した Bremsstrahlung Splitting を適用した。Splitting を適用した場合には、第 2 表の Splitting 欄に ON が、適用しない場合には OFF が書かれている。

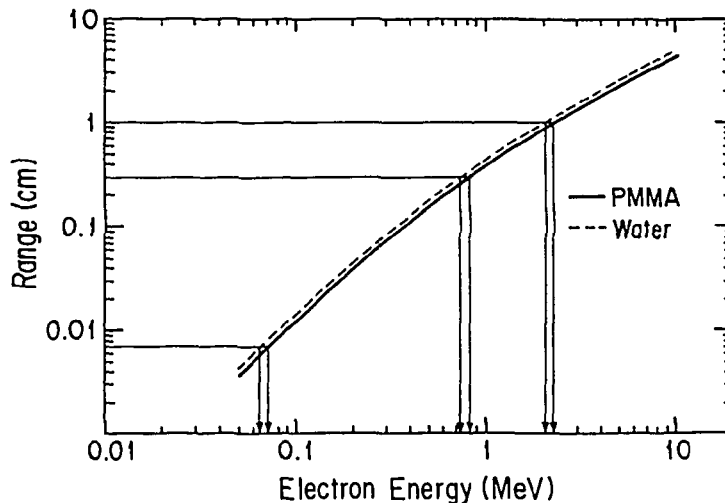


Fig. 1. CSDA range for Water (---), and PMMA(—).

Table 2. Parameters used in calculation.

	Energy (keV)					
	50	60	70	80	90	100
Histories	2000000	2000000	2000000	2000000	100000	100000
AE	0.516	0.516	0.516	0.516	0.516	0.516
AP	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
ECUT	0.516	0.516	0.516	0.516	0.516	0.516
PCUT	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Splitting*	On	On	On	On	Off	Off
CPU-time**	4.20E-3***	5.38E-3	6.21E-3	7.98E-3	7.67E-3	8.38E-3
	Energy (MeV)					
	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0
Histories	100000	100000	500000	500000	500000	100000
AE	0.516	0.516	0.516	0.516	0.516	0.516
AP	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
ECUT	0.516	0.516	0.516	0.516	0.516	0.516
PCUT	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Splitting	Off	Off	On	On	On	On
CPU-time	1.07E-2	1.80E-2	4.20E-2	4.27E-2	5.45E-2	3.60E-2
	Energy (MeV)					
	1.5	2.0	3.0	4.0	7.0	10.0
Histories	500000	500000	100000	100000	100000	100000
AE	0.516	0.516	0.516	0.516	0.516	0.516
AP	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
ECUT	0.516	0.516	0.516	0.516	0.516	0.516
PCUT	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Splitting	On	On	Off	Off	Off	Off
CPU-time	4.08E-2	5.58E-2	2.43E-2	2.94E-2	4.21E-2	5.33E-2

* Bremsstrahlung Splitting.

** Seconds per case for Tissue by DEC Station 5000/200

*** Read as 4.20×10^{-3}

4 計算結果

4.1 Depth dose curves

第2、3図に、水に対する depth dose curve を示す。第2図は、電子が垂直に入射した場合で、第3図は、75° で入射した場合の結果である。垂直入射の場合は、深さと共に吸収線量は徐々に増加し、CSDA range の約1/2 の深さで最大となり、その後急激に減少する。表面での吸収線量は電子阻止能のエネルギー依存性に対応してのエネルギーと共に減少する。75° 入射の場合は、ピークが明確に現れず、深さと共にゆるやかに減少する傾向を示す。CSDA range 以降の減少の仕方は垂直入射に較べると緩やかであるが、これは弾性散乱により横方向に散乱された電子の寄与に

よるものである。

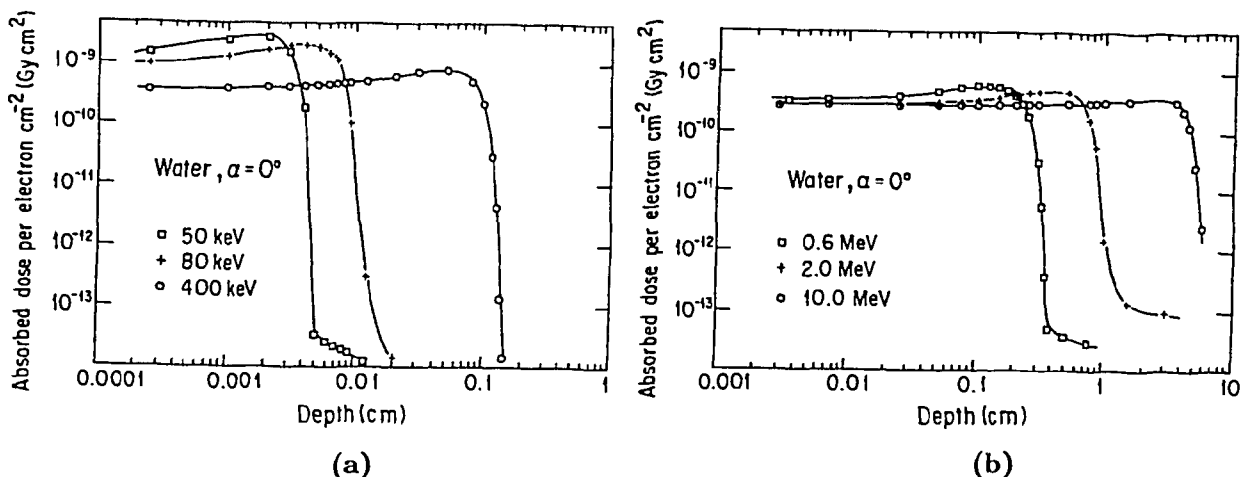


Fig. 2. Depth dose for a broad parallel beam of electrons incident normally on water ($\alpha = 0^\circ$) (a) 50, 80, and 400 keV, (b) 0.8, 2.0 and 10 MeV.

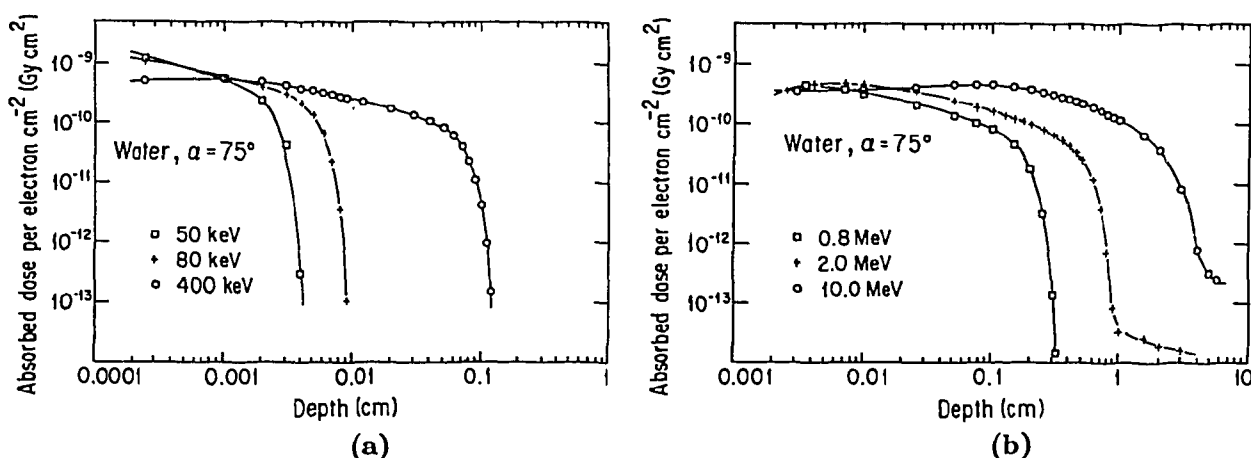


Fig. 3. Depth dose for a broad parallel beam of electrons with an incident angle $\alpha = 75^\circ$ on water (a) 50, 80, and 400 keV, (b) 0.8, 2.0 and 10 MeV.

このような現象を視覚的に理解するために、100 個の電子による tissue 中の粒子の飛跡を第 4 図に示す。実線は、電子・陽電子の飛跡を、点線は光子の飛跡を示している。

4.2 Electron energy dependence

第 5 図は、垂直入射の場合の各ファントム材中 0.07, 3.0, 10.0 mm の位置での吸収線量の入射電子エネルギー依存性を示す。当該深さが CSDA range より深くなるエネルギーで吸収線量が急激に増加する。この領域で PMMA は、他の材質よりも顕著に小さい値を示すが、これは PMMA の密度が他の材質より大きいため mm 単位で表した CSDA range が短い事による。0.07 mm の場合は、depth dose の最大値が 0.07 mm 近辺である 100 keV で最大となりその後は、エネルギーの増加と共にゆるやかに減少した後一定値になる。深さ d が大きくなるほど同様のピークは小さくなる。一定になった領域では、ファイトム材の違いによる差異は少ない。

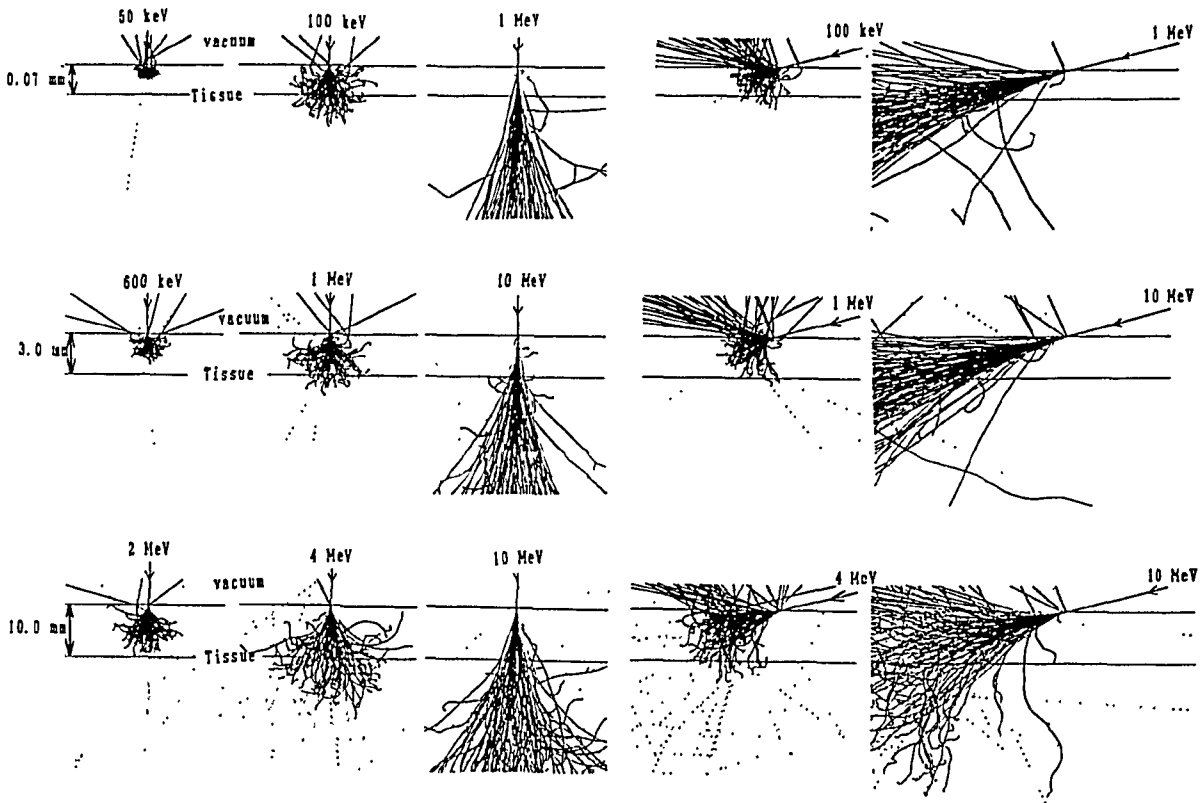


Fig. 4. EGS4-generated tracks of particles produced with 100 incident electrons in tissue. The charged particle and photon tracks are depicted as solid and dotted lines, respectively.

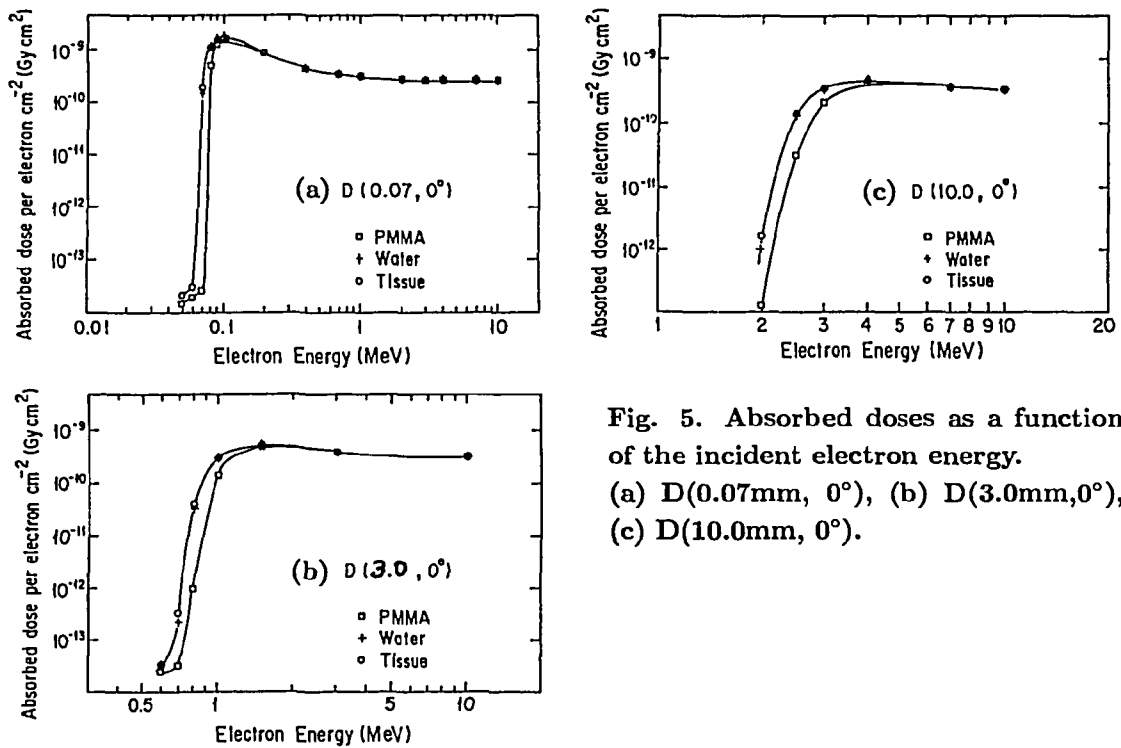


Fig. 5. Absorbed doses as a function of the incident electron energy. (a) $D(0.07\text{mm}, 0^\circ)$, (b) $D(3.0\text{mm}, 0^\circ)$, (c) $D(10.0\text{mm}, 0^\circ)$.

4.3 Incident angle dependence

Tissue に対する吸収線量 ($D(d, \alpha)$) の入射角度依存性を垂直入射の場合の吸収線量 ($D(d, 0^\circ)$) との比として第 6 図に示す。平行な電子ビームを考えると、ファントム表面の単位面積に入射する電子数は、入射角度が α になると $\cos \alpha$ 倍に減少する。一方、エネルギー吸収を考える領域の厚さは実効的に $1/\cos \alpha$ 倍となる。従って、CSDA range が、 $d/\cos \alpha$ より充分長い場合には、両者の効果はほぼキャンセルされ、弾性散乱による横方向への散乱線の寄与分垂直入射の場合より吸収線量が大きくなるため $D(d, \alpha)/D(d, 0^\circ)$ は 1 より大きくなる。CSDA range が、 d よりも短い場合には、エネルギー吸収を考える領域に到達する電子数が角度の増大と共に減少するため、 $D(d, \alpha)/D(d, 0^\circ)$ は α の増加に伴って減少する。

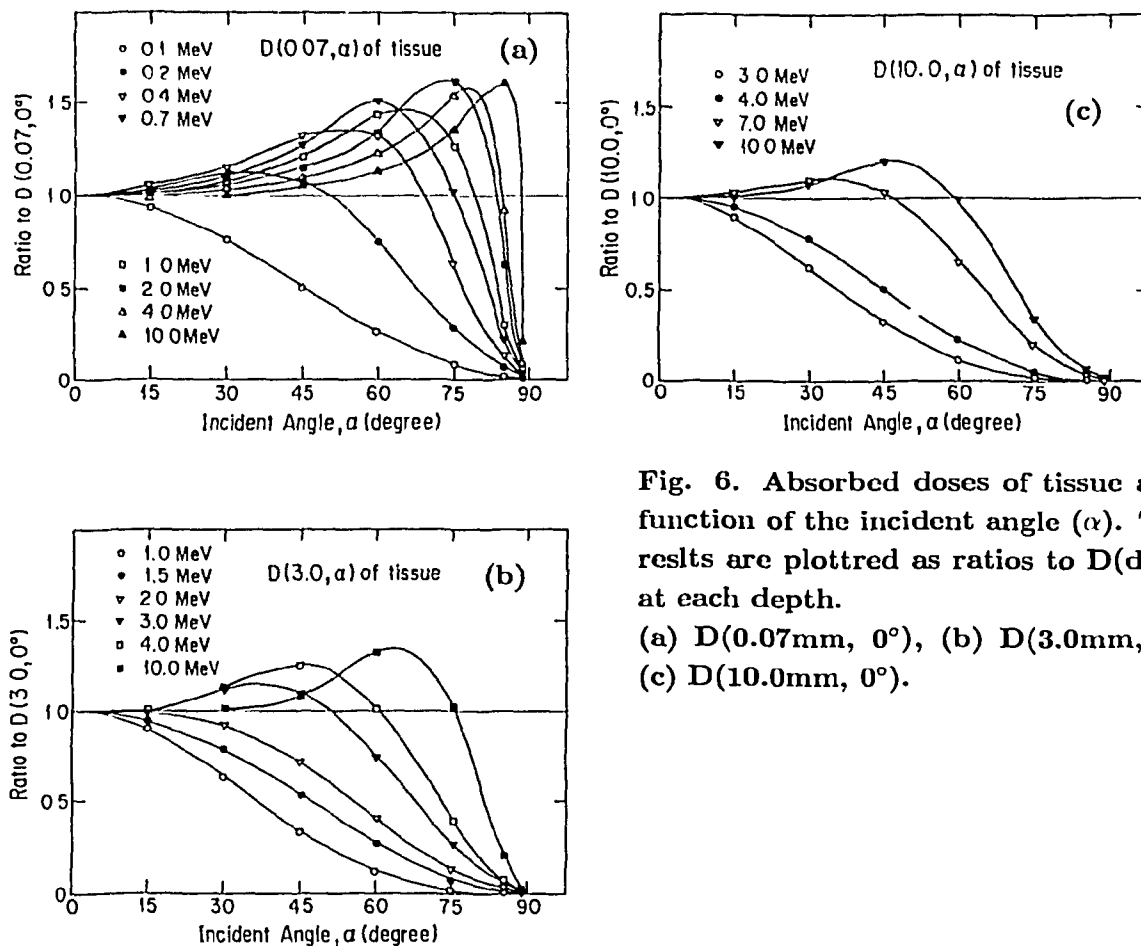


Fig. 6. Absorbed doses of tissue as a function of the incident angle (α). The results are plotted as ratios to $D(d, 0^\circ)$ at each depth.

(a) $D(0.07\text{mm}, 0^\circ)$, (b) $D(3.0\text{mm}, 0^\circ)$, (c) $D(10.0\text{mm}, 0^\circ)$.

4.4 Material dependence

各深さでの吸収線量のファントム材質依存性を tissue の吸収線量との比で第 7 図に示す。どの深さでも PMMA は、水や tissue よりも吸収線量が小さい。特に、CSDA range が当該深さ近辺のエネルギー領域で非常に小さくなる。一方、水の場合は、全般的には、tissue とよく一致しているが、CSDA range が当該深さ近辺のエネルギー領域で PMMA ほどではないが、やはり tissue より小さくなる。

第 8 図に、7,300, 1000 $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 深さでの同様の結果を示す。第 7 図とは逆に、CSDA range

が当該深さ近辺のエネルギー領域で吸収線量が tissue よりも大きくなる。

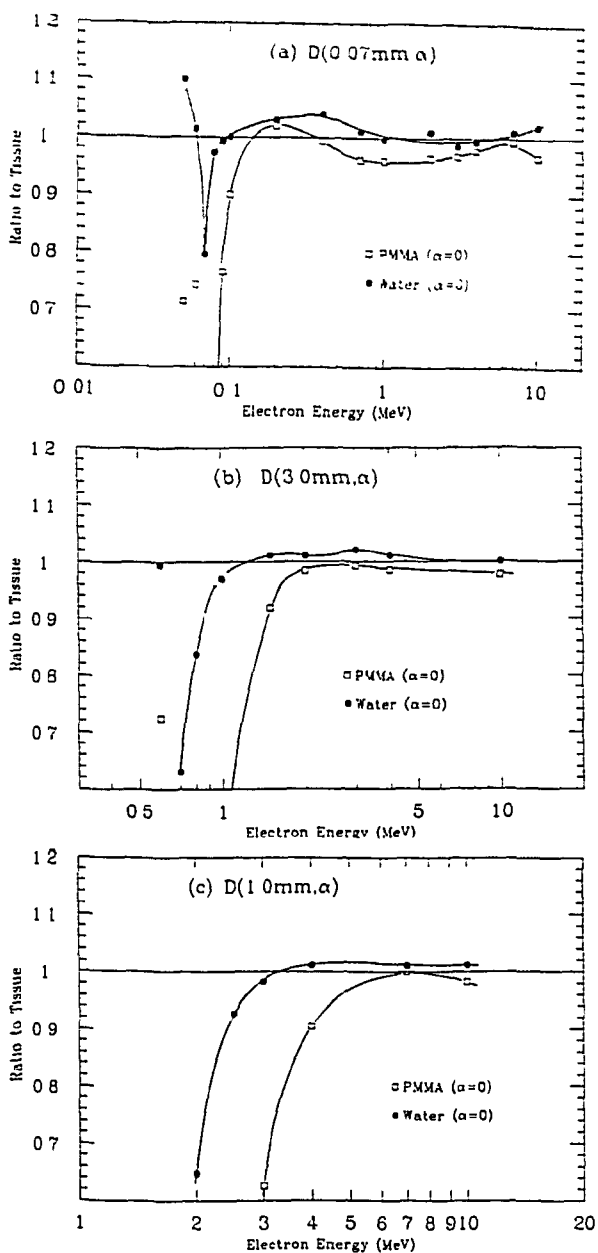


Fig. 7. Comparison of the absorbed dose ($D(d, \alpha)$) calculated for different materials. The results are plotted as ratios to the values of tissue.

- (a) $D(0.07, 0^\circ)$, (b) $D(3.0, 0^\circ)$,
- (c) $D(10.0, 0^\circ)$.

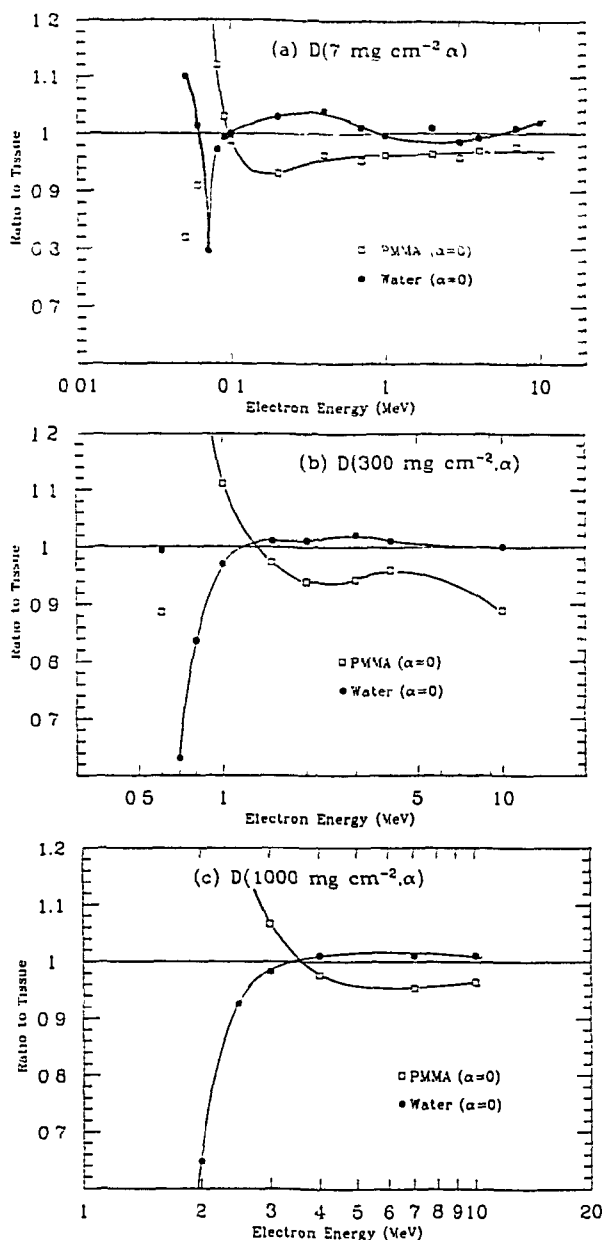


Fig. 8. Comparison of the absorbed dose ($D(d, \alpha)$) calculated for different materials. The results are plotted as ratios to the values of tissue.

- (a) $D(7\text{ mg cm}^{-2}, 0^\circ)$,
- (b) $D(300\text{ mg cm}^{-2}, 0^\circ)$,
- (c) $D(1000\text{ mg cm}^{-2}, 0^\circ)$.

5 課題の提起

WG4 の要請に応じて各国で種々の計算コードを使って計算した結果は、Raiat. Prot. Dosim. に出版されてきており [5,6,7]、すべての結果をまとめた論文も同誌に投稿の準備中である。これまでに得ている情報から見る限り、細部を除き、各計算結果は良く一致しており計算コードの相互比較という観点から見れば良い企画であったといえるが、放射線防護を考える上では、検討すべき課題がいろいろあるように思われる。気のついた点を列挙してみると、

1. ICRU 球でなく、平板ファントムを使用した事は評価できるが、文献 6 でも指摘されているように、ファントムが真空中に置かれた状態で計算した今回の結果が、実用上意味のあるデータになりうるのかどうか。
2. $30\ \mu\text{m}$ や $3\ \text{mm}$ の様に、皮膚や、目の水晶体に関連する深さという意味のある深さでのデータは良いとしても、 $10\ \text{mm}$ でのデータを計算する事が本当に意味のあることなのか。
3. そもそも、平行な電子ビームに人体がさらされる様な場が、放射線治療以外に存在するのか。(β線による被ばくが近い場として考えられるが、β線については別に評価される事になっている。)
4. 事故時等を想定して考えるならば、電子による被ばくは広い平行ビームによる全身被ばくではなく、細いビームによる被ばくの方が現実的である。より、エネルギーの高い電子を含めて細いビームによる被ばく標価をもっと真剣に考えるべきではないか。

があげられる。

参考文献

- [1] ICRU, *Radiation Quantities and Units*. Report 37 (Bethesda, MD:ICRU Publication)(1984).
- [2] ICRU, *Radiation Quantities and Units*. Report 33 (Bethesda, MD:ICRU Publication)(1980).
- [3] W. R. Nelson, H. Hirayama and D. W. O. Rogers, *EGS4 Code System*, SLAC-265, December 1985.
- [4] A. F. Bielajew and D. W. O. Rogers, *The Parameter Reduced Electron-Step Transport Algorithm for Electron Monte Carlo Transport*, Nucl. Instr. Methods, **B18** (1987) 165-181.
- [5] H. Hirayama , *Calculation of Absorbed Dose at 0.07, 3.0 and 10.0mm Depths in a Slab Phantom for Monoenergetic Electrons*, Radiat. Prot. Dosim. **51** (1994) 107-124.
- [6] B. Grosswendt, *Determination of Electron Depth-Dose Curves for Water, ICRU Tissue, and PMMA and Their Application to Radiation Protection Dosimetry*, Radiat. Prot. Dosim. **54** (1994)85-97.
- [7] G. F. Gualdrini and F. Padoani, *Monte Carlo Code Comparisons for the Calculation of Absorbed Dose per Unit Fluence in Slab Phantoms for Electrons from 50 keV to 10 MeV*, Radiat. Prot. Dosim. **54** (1994)203-207.