



Title	米国中性子線施設の線量相互比較
Author(s)	平岡, 武; 川島, 勝弘; 星野, 一雄 他
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1977, 37(10), p. 949-955
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/15520
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

米国中性子線施設の線量相互比較

放射線医学総合研究所物理研究部

平岡 武 川島 勝弘 星野 一雄
松沢 秀夫 橋 詰 雅

(昭和52年3月24日受付)

(昭和52年4月28日最終原稿受付)

Neutron Dosimetry Intercomparison between the NIRS
and Institutions for Fast Neutron Therapy in the
United States of America

By

Takeshi Hiraoka, Katsuhiko Kawashima, Kazuo Hoshino, Hideo Matsuzawa and
Tadashi Hashizume

Division of Physics, National Institute of Radiological Sciences, Chiba, 280, Japan

Research Code No.: 203

Key Words: Neutron dosimetry, Dosimetry intercomparison, Cyclotron

Neutron dosimetry intercomparisons were made between the National Institute of Radiological Sciences and some institutions for fast neutron therapy in U.S.A. . A physicist of the NIRS who brought 2 sets of paired chamber visited the M.D. Anderson Hospital-Texas A&M University, Naval Research Laboratory, and University of Washington. Neutrons are produced from accelerated deuterons on beryllium target whose energy range is from 16 to 50 MeV. During these visits, comparison was made on tissue absorbed dose in air, tissue absorbed dose in liquid phantom, and photon calibration of ionization chambers.

Results of this intercomparison showed good agreement for these items, except for tissue absorbed dose in liquid phantom at one institution. Difference in dosimetry method, evaluation of gamma dose, and correction for loss of ion recombination will be discussed.

緒 言

Stone 等¹⁾²⁾によりはじめられた速中性子線治療は MRC グループの広範囲な検討³⁾により再び注目を集め、現在先進世界各国で治療が行なわれ、我国に於てもこの目的で2台のサイクロトロンの運転され治療が始められた。

治療の基礎となるのは吸収線量であることは言

うを待たないが、原子核構成粒子の一つである中性子線であるため、X線電子線等とは異なつた相互作用を行ない、線量評価を複雑なものにしている。その一つは必ずガンマ線が混在することによるものであり、次に飛程の非常に短い重荷電粒子が放出されることである。

十分な線量率が得られるという点で現在の中性

子線治療には、一般に収率も高くターゲットアセンブリも簡単であることから $^9\text{Be} (d, n)^{10}\text{B}$ 反応によるサイクロトロン中性子が用いられている。加速エネルギーやターゲットの厚さにより異なるが、混在ガンマ線量が少ないため RBE を考えれば、ガンマ線による効果は速中性子線のそれにくらべて非常に小さいと言うことで、米国に於いては速中性子線とガンマ線の Total Dose で吸収線量を表示し治療を行なっている。

著者の一人が5本の電離箱を持参し、米国の速中性子線治療施設3カ所と線量相互比較を行なったのでその結果を述べる。

方 法

放医研（以下 NIRS と略記）と米国速中性子線治療3施設、即ち MD Anderson Hospital-Texas A&M University (MDAH-TAMU), Naval Research Laboratory (NRL), University of Washington (UW) と (1) 空中組織吸収線量 (2) フェントム中の組織吸収線量 (3) ガンマ線量の比較をすることとした。

中性子線量評価法としては数多くの方法があるが、精度良く簡便な方法としては電離箱法があり、全施設ともこの方法を基準としている。

1) 線量評価法

NIRS では1968年から始まったバンデグラフでの速中性子線治療による線量測定の経験⁴⁾を基に、1975年に開始されたサイクロトロンによる速中性子線治療へこの測定法を応用した⁵⁾。この間1973年にBNLで行なわれたINDIに参加し⁶⁾線量基準の基礎を確立した。

中性子線場には多かれ少なかれガンマ線が混在するため、対電離箱法により中性子線量とガンマ線量を独立に評価することとした。この方法に於ては、ガンマ線により放出される2次電子線や、中性子線との相互作用により放出される陽子線、 α 粒子、その他重荷電粒子に対する阻止能、吸収係数、カーマ、W値等の評価に問題点を残している。特にカーマ値は現在信頼出来るものは18MeVまでしか計算されておらず⁷⁾、それ以上のエネルギーについては各反応の断面積のデータの不足か

らはつきりした値は求められない。

対電離箱のうち特にガンマ線に高い感度を有する電離箱の中性子線に対する感度 k 値の中性子線、ガンマ線に対する誤差の評価は Goodman⁸⁾ によつて計算されており、又川島等⁹⁾及び Bichsel等¹⁰⁾は線量測定への k 値の問題点の考察を行なっている。

今回この相互比較を通じて、現在最も信頼出来るデータといくつかの仮定により NIRS のサイクロトロンに対する線量評価法を確立した⁵⁾。

MDAH-TAMU では1972年に治療を開始し、最初 MRC との比較の意味で16MeV 重陽子の $^9\text{Be} (d, n)^{10}\text{B}$ 反応による速中性子線を用いたが、すぐ50MeV にエネルギーを切換えた。線量比較のために30MeV のデータも取り、今回の相互比較もこのエネルギーを中心に16MeV と両方を用いた。NRL と UW も MDAH-TAMU に引き続き治療を開始した。

米国各施設では一般には対電離箱法を使用せず、1cc 程度の組織等価壁電離箱で線量評価している。電離ガスの重量を標準ガンマ線量から求め、Bragg-Gray の原理に従つて total dose を算定している。この場合電子線、陽子線、 α 粒子、重荷電粒子等のW値や阻止能に対する寄与の割合を実験又は仮定により求めておかなければならない。一例として各施設では次の様な仮定を行なっている。UW では $W_n = 0.85W_p + 0.15W_\alpha$, $S_n = S_p$, NRL では $W_n = W_\alpha$, $S_n = S_p$, MDAH-TAMU では $W_n = 0.86W_p + 0.09W_\alpha + 0.05W_\beta$, $S_n = 0.77S_p + 0.18S_\alpha + 0.05S_\beta$ (50MeV) の値を使用している¹¹⁾。ここで Suffix は各放射線を示す。

電離ガスは組織等価ガス (TEG) と空気を使用しており、モニタ校正等の常時の測定には空気を使用し、絶対測定の時は両ガスを用いる。これは両方の測定値に開きが出た場合、ガスの変質等のチェックが出来る利点をもっている。米国各施設の線量評価法の詳細については他の文献にゆずる^{12,13,14)}。

2) 電離箱と測定器

Table 1 に相互比較に使われた電離箱の特徴を

Table 1. Ionization chambers used for neutron dosimetry intercomparisons.
Farmer 0.6 cm³ chamber is only used for gamma ray calibration.

Institution	Type	Manufacturer	Wall material	Ionized gas	volume (cm ³) Approx.	Shape
NIRS	1.3-TE	Hand made	NIRS-TEP	TEG	1.3	Cylindrical
	1.3-T+C	Hand made	Teflon 80%+ Carbon 20%	CO ₂	1.3	Cylindrical
	150-TG	EG & G	Shonka-TEP	TEG	1	Spherical
	151-Mg	EG & G	Magnesium	Ar	2	Spherical
	Farmer	NE	Air equivalent	air	0.6	Cylindrical
MDAH-TAMU	57-TG	EG & G	Shonka-TEP	TEG air	1	Spherical
	63-Mg	EG & G	Magnesium	Ar	2	Spherical
	6cc-TE	Hand made	Shonka-TEP	TEG	6	Spherical
	6cc-Gr	Hand made	Graphite	CO ₂	6	Spherical
NRL	T-34	EG & G	Shonka-TEP	TEG air	1	Spherical
UW	47-TG	EG & G	Shonka-TEP	TEG air	1	Spherical
	TE-38	EG & G	Shonka-TEP	TEG air	1	Spherical

示す。NIRS では5本の電離箱を使用した。Farmer 0.6cc 電離箱はガンマ線の比較のみに使われ、残り4本で2組の対電離箱とした。米国側は1ccのEG&G社の組織等価プラスチック(TEP)電離箱を基準にしているが、MDAH-TAMUはこれに加え2cc Mg 壁と自家製の6cc 対電離箱を用いた。NIRSの1.3ccの自家製対電離箱は円筒型であるが、他は全て球型である。各TEP電離箱にはエネルギーに応じて適当な厚さのBuild-up capをかぶつ、又ガンマ線に高い感度を有する電離箱には電離箱壁の外で発生した反跳陽子が電離気体中に入るのを防ぐために壁材質と同じ物質のcapを陽子の飛程から厚さを計算してかぶせた。

NIRSからは電離箱とコンデンサーしかもつて行かなかつたため、測定器は各施設のものを借用することにした。MDAH-TAMUではKeithley Model 602で、UWではKeithley Model 615のMOS FET入力のエレクトロメータで、NRLではCary Model 31の振動容量電位計を使用した。各施設ともデジタルボルトメータで読取り、測定系全体を基準器で校正してある。

3) 中性子線場

全ての施設がサイクロトロンを使用し⁹Be(d,n)¹⁰B反応による中性子線を発生源としているため、ターゲット厚さやエネルギーに依るが、基本的には似たスペクトルを有する線源と言える。Table 2に中性子線場の比較を示す。重陽子の加速エネルギーは16MeVから最大50MeVであるが、NIRSでは50MeVに対する線量評価のための定数が確立されていないため感度を取るのにとどめた。

照射野は各SSDで10×10cm²で、電離箱は幾何学的中心で比較することにした。Shapiro等¹⁹⁾は中性子線場での電離箱の実効中心を実験的に求めている。ここではこの補正を加えてないが、ファントム中での比較に於て、各電離箱のサイズが大きく異なる場合には補正する必要がある。

結 果

1) ガンマ線量

全ての施設で中性子線量評価の基準はガンマ線の校正によつて行なわれているので、ガンマ線量の比較から行なつた。各施設で決定した⁶⁰Coガ

Table 2. Comparison of beam characteristics. Data are taken from references 10 and 24.

	MDAH-TAMU			NRL	UW
Energy of D ⁺ (MeV)	16	30	50	35	21.5
Beryllium target (thickness, mm)	intermediate 1.14	thick 3.38	thick 8.48	thick 4.7	intermediate 1.5
Mean neutron energy (MeV)	7	13	21	15	8
Collimation for field shaping	WEP+B+Fe (70 cm)	WEP+B+Fe (70 cm)	WEP+B+Fe (70 cm)	Benelex (65 cm)	WEP+B (75 cm)
SSD (cm)	127	127	140	125	150
Field size definition (Isodose-light field; 10×10cm field at SSD)	50%	50%	50%	90%	50%
Beam flattening	no	no	yes	proposed	no
Deuteron beam current (μA)	40	7	7	10	30
Depth of 50% dose (10×10 cm field, g/cm ²)			13.8	12.8	10.2
Depth of d _{max} (g/cm ²)			1.07	0.55	0.30

Table 3. Results of gamma ray intercomparisons.

	MDAH/ NIRS	NRL/ NIRS	UW/ NIRS	EG&G/ NIRS
1.3-TE-TEG	1.008	1.008	1.017	
1r3-T+C-CO ₂	0.990	1.003	1.015	
150-TG-TEG	1.009	1.022		1.007
151-Mg-Ar	0.996			0.987
Farmer	0.991			

ソマ線の放射線場に NIRS 電離箱を置き、各電離箱の Coulomb/rad を求めガンマ線量の比較とした。但し NRL は ¹³⁷Cs を線源とした。吸収線量 D (rad) = 0.957 × 0.985 × X(R) で評価し NIRS との比を Table 3 に示す。

NIRS と MDAH では全て 1% 以内で一致しており、NRL とは 150TG を除いて 1% 以内の良い一致を示した。UW とは 2% 弱の一致であつた。表 3 中最後の欄は EG&G 社で値付けしたものである。全体として非常に良い一致が得られたと言える。

MDAH には Radiological Physics Center があり、米国の治療用線量の 2 次標準がここに置かれている。NIRS は我国の治療用線量の準標準センターであり、MDAH と 1% 以内の良い一致が

Table 4. Results of intercomparison of total tissue absorbed dose in free space.

MDAH-TAMU/NIRS		NRL/NIRS	UW/NIRS
16 MeV	30 MeV	35 MeV	21.5 MeV
1.002	1.007	0.994	1.026

得られたことは誠に意義深い。

2) 空中組織吸収線量

中性子線は空中と液体ファントム中の吸収線量で比較することにした。ここで吸収線量とは Total dose をさし空中での結果を Table 4 に示す。NIRS では全ての施設で 1.3cc 対電離箱と 150-TG と 1.3T+C の 2 組の対電離箱で線量評価を行なった。MDAH-TAMU では 1 組の対電離箱と 1 本の電離箱で線量を求めたが、この場合は平均値を取り、又その他の施設では単独の電離箱による線量値を NIRS の平均値と比較してみると、UW を除いて 1% 以内の一致という非常に良い結果が得られた。但し 16MeV の場合 NIRS の 150-TG の値は 7% も開きがあり、これは何か異常があつたものと思われ比較からは取り除いた。UW とは 2.6% で一致したが、基準となるガンマ線量の比較で 2% 弱の一致であつたのでこの点を考慮すればやはり良い一致である。

混在ガンマ線量の値は表には示していないが、NIRS の値は全ての施設で大きい評価となった。

3) ファントム中の組織吸収線量

ファントム中での結果を Table 5 に示す。組織等価溶液は Frigerio 等¹⁶⁾ の提唱したものを全ての場合使用した。この溶液の密度は25°Cで1.078g/cm³とされてされているが、Table 5 中深さ d はファントム表面から検出器中心までの距離をさす。

Table 5. Results of intercomparison of total tissue absorbed dose in liquid phantom. d is the distance from front surface of the phantom to geometrical center of chamber.

	MDAH-TAMU/NIRS 30 MeV	NRL/NIRS 35 MeV	UW/NIRS 21.5 MeV
d = 2 cm			1.027
5 cm	1.043		
10 cm	1.056	1.014	1.038
15 cm	1.049		
20 cm	1.060		

NRL とは深さ 1 点のみであるが1.4%と非常に良い一致が得られた。UW とは2.7%と3.8%の一致であつたが、空中での比較から見れば良い一致と言える。MDAH-TAMU とは最低4.3%から最大6.0%の開きがあり、空中での0.7%の良い一致からすれば説明しがたい差である。電離箱の Leakage current は無視出来るものであるし、測定系も両者で同じ状態であるので、電離ガスの Flow 系統に故障があつたか、電離箱のステム部分の違いによりここからの散乱線のきき方が異なることによることしか考えられない。期間とマシンタイムの関係でくり返し実験が行なえずこの点を解明出来なかつたが、今後別の線源によりこの点を明らかにする予定である。

考 察

日本から測定器を持つて行つて、測定系全体を含めての線量相互比較でないので測定系の違いに不安があつた。しかし日本電気計器検定所で校正され、 $1208.3 \times 10^{-12} \text{F}$ と値付けされた スチロー

ルコンデンサを MDAH の基準測定器で校正した所 $1208.47 \times 10^{-12} \text{F}$ という値が得られた。これは0.01%という非常に良い一致であり、コンデンサを仲介にはいるが測定系には日米間で全く問題がないと言える。

空中組織吸収線量の比較に於て UW を除けば1%以下の極めて良い一致である。但し平均値での比較であり、電離箱での違いは2%程度あり、形状の違いはあるにしても電離体積が同じ位であるから原因を解明することはむずかしい。考えられる原因の一つとして壁材質である TEP の組成の違いがある。EG&G 社は Shonka¹⁷⁾ の A-150 TEP で NIRS は自作¹⁸⁾ のものを使っている。含有元素のうち特に水素含有量がエネルギー吸収に大きく寄与する。Smathers¹⁹⁾ と川島は NIRS TEP と A-150 TEP の化学分析を同時に行なつたが、水素含有量は両者とも0.1% A-150 TEP の方が多いという結果を得た。最近伊藤²⁰⁾ は両 TEP を用いて同型同大の電離箱を作り、15MeV~50MeV の Be (d,n)B 反応による中性子線の測定を行ない、両 TEP の違いによる線量値の比較を実験により求めたが、最大1%以内の差での一致を得た。この結果からして2%の差を TEP だけの違いによる影響をみるのはむずかしい。

空中での比較から見れば水中での値は予想出来るものである。但し MDAH-TAMU との値は大きく開いており、この点についてはその後米国から3人の物理学者が来日し、NIRS と医科研で行なつた線量相互比較の実験や、医科研と米国施設で行なわれた第3次の比較の結果を待つて判断をせざるを得ない。

今回の線量比較は Total dose で行なつたが、混在ガンマ線量の評価も問題点の一つである。空中、ファントム中両方に於て NIRS の値は米国側施設のガンマ線量より大きく見積つている。特に NRL ではガンマ線量の中性子線量に対する割合は1.4%としているが、我々の評価では6.8%となる。これは線量評価法の違いによるものと思われ、先に行なわれた米国施設と MRC との相互

比較に於ても同様な傾向を示している¹¹⁾。混在ガンマ線量の評価法も種々あるがそれぞれ一長一短あり、ガンマ線量の絶対値については今後の課題である。

我々は対電離箱を使用したので両電離箱のイオン再結合損失による補正を加えなければならない。炭酸ガスの中性子に対する飽和特性は他の線量測定用ガスに比して非常に悪く、これは初期再結合損失の影響であることを以前解明した^{21,22)}。川島等²³⁾は飽和曲線から真の電離電流算定法を求めたが、ここでも NIRS のバンデグラフ及びサイクロトロン、TAMU のサイクロトロンで重陽子の加速エネルギーを変えて飽和特性を取り、補正係数を200V の印加電圧に対し1.075と求めた。TEP 電離箱の方は一般再結合損失が大部分を占めるため線量率に依存するが、補正係数は全て1%以下であつた。米国側は TEP 電離箱のみによる線量評価では印加電圧を250~500V 加えているので、この点に関する誤差は少ない。

今後第2次、第3次と行なわれる線量相互比較に於ては中性子線量とガンマ線量をそれぞれ独立に比較し、又誤差の評価をも含めることが望まれる。

本研究は日本学術振興会の日米癌協力研究事業の援助を受けた。研究推進に当り、高 LET 放射線療法部会長の癌研津屋旭、放医研梅垣洋一郎、学振原現吉、北村佑子の各氏に心から感謝致します。又米国側の線量評価は MDAHTAMU では P.R. Almond, J.B. Smathers, W. Grant II (NCI の Grant CA-12542 による), NRL では F. H. Attix, R.O. Bondelid, L.S. August, P. Shapiro, UW では H. Bichsel, P. Wootton, J. Eenmma の各氏によつて行なわれたものであり心から感謝の意を表します。

文 献

- 1) Stone, R.S.: Neutron therapy and specific ionization. *Am. J. Roentgenol. Radium Ther. Nucl. Med.*, 59: 771—785, 1948
- 2) Stone, R.S. and Larkin, J.C., Jr.: Treatment of cancer with fast neutrons. *Radiology*, 39: 608—620, 1942
- 3) Pretherapeutic experiments with the fast neutron beam from the Medical Research Council Cyclotron. *Brit. J. Radiol.*, 36: 77—121, 1963
- 4) Hiraoka, T., Kawashima, K., Inada, T. and Matsuzawa, H.: Paired ionization chambers for measurement of neutron and gamma rays. *Strahlentherapie* 141: 64—68, 1971
- 5) 平岡 武, 川島勝弘, 星野一雄, 松沢秀夫: 放医研 サイクロトロン速中性子線の線量測定. *日本医放会誌*, 37: 369—376, 1977.
- 6) 川島勝弘, 星野一雄, 平岡 武, 丸山隆司, 松沢秀夫: ²⁵²Cf 線源のカーマ率の測定. *Radioisotopes*, 24: 3—9, 1975.
- 7) ICRU Report 13. Neutron fluence, neutron spectra and kerma, 1969
- 8) Goodman, L.J.: Uncertainty analysis for dosimetry in a mixed field of neutrons and photons. *Proc. Second Symp. Neutron Dosimetry Biol. Med.*, 227—240, 1974
- 9) 川島勝弘, 平岡 武, 星野一雄, 松沢秀夫: 対電離箱の中性子感度 k の考察. *日本医放会誌*, 36: 449—450, 1976.
- 10) Bichsel, H., Eenmaa, J., Weaver, K. and Wootton, P.B.: Attainable accuracy in fast neutron dosimetry system. *Proc. Int. Workshop, Particle Radiat. Ther.*, 71—105, 1975
- 11) Smith, A.R., Almond, P.R., Smathers, J.B., Otte, V.A., Attix, F.H., Theus, R.B., Wootton, P.B., Bichsel, H., Eenmaa, J., Williams, D., Bewley, D.K. and Parnell, C.J.: Dosimetry intercomparisons between fast-neutron radiotherapy facilities. *Med. Phys.*, 2: 195—200, 1975
- 12) Almond, P.R., Smathers, J.B., Oliver, G.D., Jr., Hranitzky, E.B. and Routt, K.: Dosimetric properties of neutron beams produced by 16—60 MeV deuteron on beryllium. *Radiat. Res.*, 54: 24—34, 1973
- 13) Attix, F.H., Theus, R.B., Shapiro, P., Surratt, R.E., Nash, A.E. and Gorbics, S.G.: Neutron beam dosimetry at the NRL cyclotron. *Phys. Med. Biol.*, 16: 497—507, 1973
- 14) Bichsel, H., Eenmaa, J., Weaver, K., Williams, D.L., Wootton, P. and Wyckoff, W.G.: Fast neutron beam dosimetry: comparison of the ion chamber and proportional counter approaches. *AAPM Quart. Bull.*, 7: 93, 1973
- 15) Shapiro, P., Attix, F.H., August, L.S., Theus, R.B. and Rogers, C.C.: Displacement correction factor for fastneutron dosimetry in a tissue-equivalent phantom. *Med. Phys.*, 3: 87—90, 1976
- 16) Frigerio, N.A., Coley, R.F. and Sampson, M.J.: Depth dose determinations. I. Tissue-equivalent liquids for standard man and muscle. *Phys. Med. Biol.*, 17: 792—802, 1972
- 17) Shonka, F.R., Rose, J.E. and Failla, G.:

- Conducting plastic equivalent to tissue, air and polystyrene. Proc. Second Int. Conf. Peaceful Use of Atomic Energy., 21: 184—187, 1958
- 18) 平岡 武, 川島勝弘, 星野一雄, 松沢秀夫: 中性子線用組織等価物質の試作. 日本医放会誌, 36: 420—424, 1976.
- 19) Smathers, J.B.: Private communication.
- 20) Ito, A.: Neutron dosimetry intercomparison between Japan (Univ. of Tokyo) and U.S.A.. Proc. Third Symp. Neutron Dosimetry Biol. Med.
- 21) 平岡 武, 川島勝弘, 星野一雄, 松沢秀夫: 対電離箱の飽和特性, その1 平行平板型. 日本医放会誌, 36: 450, 1976.
- 22) 平岡 武, 川島勝弘, 星野一雄, 松沢秀夫: 対電離箱の飽和特性, その2 円筒型. 日本医放会誌, 37: 89, 1977.
- 23) 川島勝弘, 平岡 武, 星野一雄, 松沢秀夫: 円筒型対電離箱の再結合損失. 日本医放会誌, 37: 170—176, 1977.
- 24) Almond, P.R., Smith, A.R., Smathers, J.B. and Otte, V.A.: Dosimetric properties of the fast neutron therapy beams at TAMVEC. Proc. Second Symp. Neutron Dosimetry Biol. Med., 359—374, 1974
-