



Title	事故時における被曝線量の推定 1. ヒューマンカウンタによる全身 ^{24}Na 量の測定
Author(s)	丸山, 隆司; 飯沼, 武
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1967, 26(11), p. 1531-1538
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/19825
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

事故時における被曝線量の推定

1. ヒューマンカウンタによる全身²⁴Na量の測定

放射線医学総合研究所 物理研究部

丸山隆司 飯沼武

(昭和41年7月11日受付)

Radiation dose Estimation in Criticality Accident

1. Calibration of the NIRS Human Counter with Sodium-24 Solution in Human Body

by

Takashi Maruyama and Takeshi A. Iinuma

Physics Division, National Institute of Radiological Science

When accidents involving serious exposure to neutrons have occurred in a place without an adequate physical dosimetry system, the neutron-induced body activity has been used as an indication that a significant neutron exposure occurred and as a rough measure of the actual neutron dose received. If fast neutrons were incident upon a human body, some of the sodium-23 which it contains becomes activated to produce sodium-24. This isotope decays with a half-life of 15 hours emitting 1.37 MeV and 2.75 MeV gamma rays. As the whole body sodium activity gives a measure of the total incident neutron flux, which combined with a knowledge of the neutron spectrum enables the dose to be calculated, the observation of the sodium activation is the most important measurement for the derivation of the received dose.

The sodium activity may be measured by whole body monitoring, with a human counter. In this paper, the measurement of the whole body sodium-24 activity in the NIRS whole body monitor has been discussed, which may be carried out in the event of the accidental neutron exposure such as in a criticality accident.

To evaluate a calibration factor for the measurement of sodium-24 activity and the distribution of sodium-24 in the human body, the sodium chloride solution containing sodium-24 was orally administered into three adult men. Using a hollow phantom, roughly body shaped and filled with the physiological saline solution containing sodium-24 activity, the calibration factor of phantom was compared with the human case. The interference of chlorine-38, which is produced by neutron irradiation of the chlorine-37 in the body, was also discussed.

The results of the experiment led to the conclusion that within about 30 minutes after irradiation of any part of the human body by neutrons, most of the resultant sodium-24 activity would have spread throughout the whole body. The calibration factors for both the human and the phantom case agreed within ± 10 percent. From these results, it was suggested that a reasonable representation of the human case could be achieved by using the phantom.

1. 緒 言

核暴走など突発事故が発生した場合、放射線障害治療の立場からできるだけ早く被曝線量を知ることが必要である。事故時において問題となる放射線は中性子と γ 線であるが、被曝者が適当な個人線量計を装備していなかった場合には被曝した全放射線量を推定することは容易ではない。しかし、このような場合でも生体物質や所持品の誘導放射能を利用すれば、被曝中性子線量の推定は可能である。

Hempelmann et al¹⁾、や Hurst と Ritchie²⁾ らは全身の Na の誘導放射能から、また Peterson et al³⁾ は体毛中の S を用いて被曝速中性子線量の推定を行った。その他貨幣、時計バンドなど金属製所持品の中性子による誘導放射能からも中性子線量は推定できる。

γ 線については臨界集合体など等価線源を用いて理論的に被曝線量を推定する方法が報告されている⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

臨界事故などで、人体が中性子に被曝した場合、全身に存在する ^{23}Na は放射化されて ^{24}Na になる。この同位元素は半減期15時間の β 、 γ 線放射体である。全身に生成された ^{24}Na 量は全入射中性子数に近似的に比例し中性子のエネルギーにはあまり関係しない⁷⁾⁸⁾。従って、事故時における中性子のエネルギー・スペクトルが知られているならば、全身 ^{24}Na 量を測定することにより容易に中性子線量が推定できる。ここで推定可能線量をできるだけ低くするためには Whole Body Counter (以下 W.B.C. と云う。) による ^{24}Na 量の全身計測が用いられる。

一方、被曝線量と起りうる放射線障害との関係については広島、長崎の原爆被曝者のデータをもとにして放医研と A.B.C.C. などで研究がすすめられている。従って、事故時における被曝線量の推定方法を確立することはあわせて放射線障害治療上有意であると思われる。

この考えにもとづき過去3年間、いろいろな方法を用いて事故時における被曝線量の推定について研究してきた。

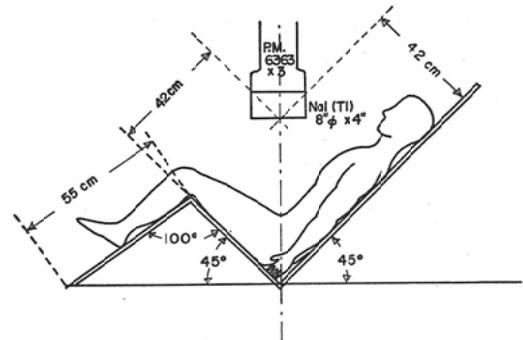
今回は放医研の W.B.C. について、ファントムと成人を用いて全身 ^{24}Na 量の測定のための較正定数を求め、両者のそれを比較した。さらに全身 Na の体内分布、 ^{37}Cl (n, γ) ^{38}Cl 反応によって体内に生成される ^{38}Cl の全身 ^{24}Na 量の測定に及ぼす影響など種々の問題について検討した。

2. Whole Body Counter

放医研の W.B.C. の一般的特性についてはすでに田中⁹⁾らによって報告された。W.B.C. は鉄遮蔽室、検出器、電子回路およびベッドなど付属部品からなる。

^{24}Na の測定には NaI (TI) シンチレーション型 W.B.C. が用いられるが、これの検出器として 8" ϕ \times 4" の NaI (TI) シンチレータに 3" ϕ の光電子増倍管 (Du Mont 6363) 3本がマウントされた Harshaw Chemical Co. 製の Matched

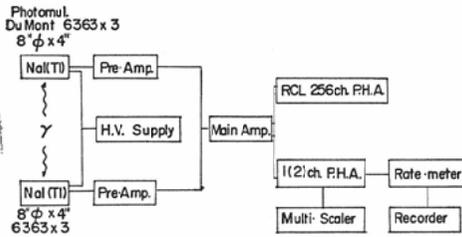
Fig. 1. Standard chair geometry



window type 2 コが水平なルサイト製ベッドの上下に設けられ、手動によって上下できると共に電動によってベッドの長さ方向にスキャンニングするようにもできる。スキャンニングの場合には厚さ5cmの鉛でつくられたコリメータが用いられる。これは巾10cm、長さ15cmのスリット状である。ベッドは曲折可能で standard chair として使用できるが、その場合には検出器は上側だけを用い Fig. 1 の如き配置図で測定する。

この W.B.C. の電子回路のブロック・ダイアグラムは Fig. 2 で示され、比例増巾器としては A-61型が用いられ、 γ 線スペクトルの測定には

Fig. 2. Block diagram of the electronic equipment



265チャンネル波高分析器が使用される。

検出器とベッドはバックグラウンドを低減させるため厚さ20cmの鉄遮蔽室に入っている。また鉄室内部でのγ線の散乱線を少くして低エネルギー部分のバックグラウンドを低下させるため、鉄室内面に厚さ3mmの鉛板をはり、さらにルサイト板で仕上げがしてある。

3. 実験

W.B.C. の校正および Na の体内分布の測定には ²⁴Na を経口投与した成人男性3人と、一定量の ²⁴Na を一様に混合した生理的食塩水溶液をみ

たしたポリエチレン製ファントムが用いられた。

a) ファントムと Na 溶液

ファントムは市販されている標準タイプが用いられた。外側の寸法や内容積は第1表の如くである。ファントムの壁厚はいずれも0.5cmである。ファントムに生理的食塩水をみだし、その中に5mlで200μCiの²⁴Na溶液を加えて比放射能を0.0465 nCi/mlとした。ファントムにみだした溶液の全容積は43lであった。この比放射能は校正されたウエル型 NaI (Tl) シンチレーションγ線スペクトロメータで精度3%以内で測定された。

b) 人体と Na 投与量

第2表に示す如き大きさの成人男性3人に²⁴Naを経口投与した。投与された²⁴Naの比放射能はファントムの場合と同様にして測定された。各人に投与された²⁴Naの比放射能を第2表に示す。これらの成人はいずれも健康体であった。

c) Na の体内分布

Na は人体内で器管や組織を通してほぼ一様に分布しており、血液に混って体内を循環している。

Table 1. External Dimensions and Internal Volumes of Man-Phantom

Phantom Section	Cylinder Shape	Nominal Cylinder Length (cm)	Nominal Cylinder Cross Section (cm)	Measured Internal Volume (ml)
Head	Circular	20	18 dia.	4500
Neck	Circular	7	12 dia.	730
Thorax	Elliptical	20	32.5 X 20	8300
Abdomen	Elliptical	20	29.0 X 18	6350
Lumber	Elliptical	23	32.5 X 20	9500
Thighs	Circular	30	max. 15dia. min. 10dia.	3000 X 2
Lower Legs	Circular	35	max. 10 dia. min. 6.5 dia.	1460 X 2
Feet	Box	7	7 X 7 X 10	500 X 2
Arms	Circular	68	max. 8 dia. min. 5 dia.	1850 X 2

Nominal phantom length.....162.0 cm Total measured internal volume.....43000 ml

Table 2. Discription of the subjects and the administered dose

Subject	Age	Height (cm)	Weight (kg)	Chest (cm)	Administered dose (μCi)
T	48	160.8	57.3	18.0 X 26	6.44
S	31	164.0	62.5	18.5 X 28	6.28
Y	27	173.0	69.8	18.0 X 26	6.17

いゝな人体臓器などと迅速な交換状態にあると考えられる。

臨界事故などで局部的に中性子被曝した場合には放射化されて生成された ^{24}Na は全身を循環して一様化される。従って、 ^{24}Na の体内分布が中性子被曝後時間と共にどのように変化するかを知ることは被曝中性子線量を推定する上に必要不可欠である。

ここでは経口投与後の成人について W.B.C. による linear scanning method を用いて ^{24}Na の体内分布の経時的变化を測定した。 ^{24}Na の scanning にはシングルチャンネル P.H.A. を用いて、2.53~3.00 MeV のエネルギー巾をはさんで計数した。頭から脚まで1回の scanning に要した時間は15分であった。

d) ^{24}Na 量の測定

Fig. 1 に示した standard chair を用い、人体ならびにファントムの ^{24}Na の γ 線スペクトルを測定した。人体については ^{24}Na の体内分布が平衡に達するのを待って計測を行なった。エネルギー較正には ^{88}Y , ^{60}Co からの γ 線が用いられた。

e) 全身 ^{24}Na 量の測定に及ぼす ^{38}Cl の影響

人体が中性子に被曝した場合、放射化される結果多量の ^{38}Cl が生成される。

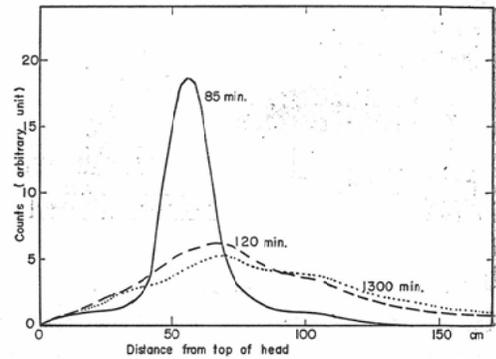
全身 ^{24}Na 量の測定に及ぼす ^{38}Cl の影響を調べるため、9.5 l の生理的食塩水をみたしたポリエチレン容器に中性子を1時間照射して4" ϕ \times 4" の NaI(Tl) シンチレータを用いて、 $^{24}\text{Na} + ^{38}\text{Cl}$ からの γ 線スペクトルを測定し、さらにこのスペクトルの経時的变化を調べた。

4. 結果と考察

a) ^{24}Na の体内分布

linear scanning によって得られた ^{24}Na の経時的变化を Fig. 3 に示す。これらの図は身体各部位からの ^{24}Na の計数値の和を100に正規化して得られたものである。経口投与後85分ではまだほとんどが胃に集っているが、時間がたつにつれて徐々に体内に分布し投与後120分位で平衡に達すると考えられる。胃や腸から吸収された ^{24}Na は体内を循環して全身にひろがるまでに35分程度の時

Fig. 3. Profile of scanning curve at time after oral administration. Total area under each scanning curve is normalized to unit count.



間を要することになる。しかし、心臓が中性子に被曝した場合を考えれば血流のスピードから類推してさらに短時間で体内に分布するであろう。これらのことを考慮すれば、事故時において局部的或いは全身に中性子を被曝した場合には被曝後30分位で生成された ^{24}Na の体内分布が平衡に達すると考えられる。

b) ^{24}Na のエネルギー・スペクトル

人体ならびにファントムについて W.B.C. で得られた ^{24}Na のエネルギー・スペクトルは Fig. 4 の如くである。NaI (Tl) シンチレータで測定さ

Fig. 4. Sodium-24 spectra for solutions in man-phantom and for human.

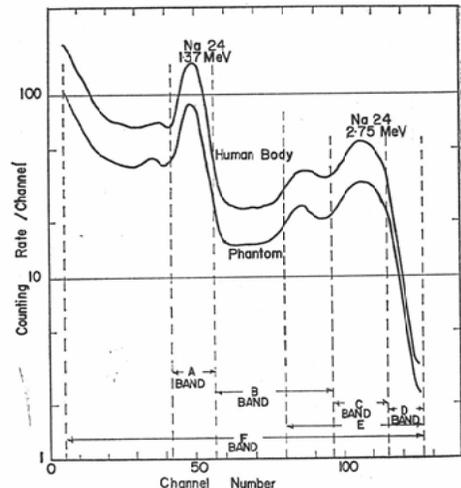


Table 3. Counting rates produced in selected energy bands by 1 μ Ci of sodium-24

Subject	Band A 1.20—1.53 MeV	Band B 1.53—2.53 MeV	Band C 2.53—3.00 MeV	Band D 3.00—3.30 MeV	Band E 2.14—3.30 MeV	Band F 0.16—3.30 MeV
T	8980	7060	5359	627	9074	48190
S	9020	7058	5628	673	8979	49380
Y	8605	6854	5165	665	9022	47830
Phantom	10580	7691	5795	1167	10420	64680

All counting rates are in counts per minute above background. No chlorine-38 activity present.

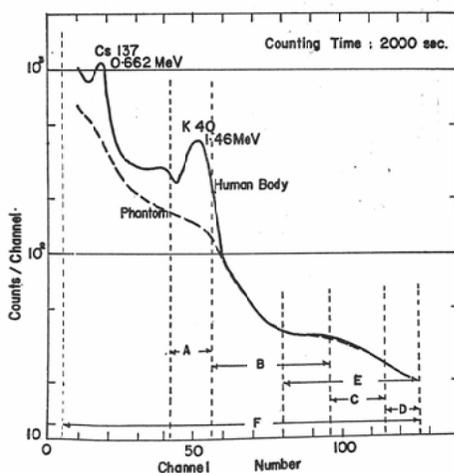
れた ^{24}Na の代表的なエネルギー・スペクトルでは4つのピークをもつ。すなわち、1.37 MeV と 2.75 MeV には ^{24}Na からの γ 線による光電ピークがあらわれ、2.75 MeV にふずいする第1, 第2エスケイプピークが2.24 MeV と1.73 MeV にあらわれる。しかし、シンチレータが大きくなると高エネルギー γ 線の吸収が大きくなるため、2.75 MeV での光電ピークが大きくなる。一方、0.51 MeV の消滅量子のエスケイプの確率はシンチレータが大きくなるにつれて小さくなる。従って、8'' ϕ ×4''と云う大きなシンチレータを用いた場合には ^{24}Na のエネルギー・スペクトルは Fig. 4 の如くなる。

W.B.C. による ^{24}Na 量の測定にあたっては、人体あるいはファントムの γ 線バックグラウンドが低く、中性子被曝時に人体に誘導される ^{38}Cl など妨害核種の影響が小さいエネルギー・バンドを用いることが必要である。Fig. 4 に示す如く W. B.C. で得られた γ 線エネルギー・スペクトルから6つのエネルギー・バンドを設けた。まず、 ^{24}Na からの γ 線による光電ピークを中心に A (1.20~1.53 MeV), C (2.53~3.00 MeV) バンドとし、エスケイプ・ピークを含めて B (1.53~2.53 MeV) バンドとした。さらにエネルギー巾をひろげて D (3.00~3.30 MeV), E (2.14~3.30 MeV), F (0.16~3.30 MeV) バンドを設けた。第3表はファントムと人体について得られた ^{24}Na 1 μ Ci 当りの各バンドの計数率を示す。

c) バックグラウンド

生理的食塩水をみだしたファントムあるいは人体について得られたバックグラウンドの γ 線スペクトルは Fig. 5 に示される。人体の場合に天然カリウム-40とフォール・アウトからのセシウム-137の2つの放射性同位元素を含んでいる。人体とファントムについて、バックグラウンドの計数

Fig. 5. Background spectra of subjects.



率を各バンドで示すと第4表の如くなる。Aバンドには ^{40}K の光電ピークが含まれるため、このバンドのバックグラウンドは高くなり、 ^{40}K 量が個人差をもち、同1人でも日によつて変動することを考えると、このバンドは ^{24}Na 量測定には適していない。

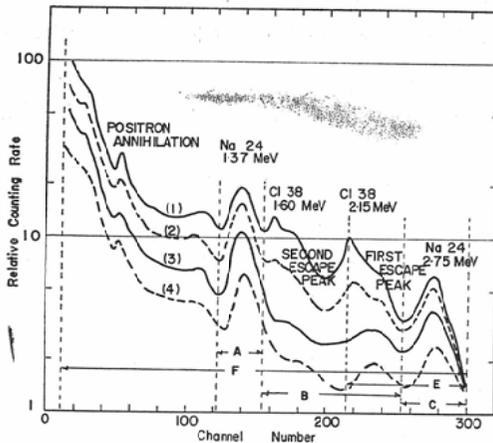
Table 4. Background counting rates for man-phantom and human bodies

Subject	Band A	Band B	Band C	Band D	Band E	Band F
T	137.4	96.5	19.5	9.4	67.7	1660
S	144.6	98.5	20.5	9.3	47.8	1830
Y	143.3	81.5	20.0	8.4	45.9	3410
Phantom	45.6	63.6	18.0	8.2	45.0	571

All counting rates in counts per minute.

Fig. 6. Typical spectra for mixture of sodium-24 and chlorine-38 with 4" detector. Curves show the spectrum at various time after one hour period of neutron irradiation.

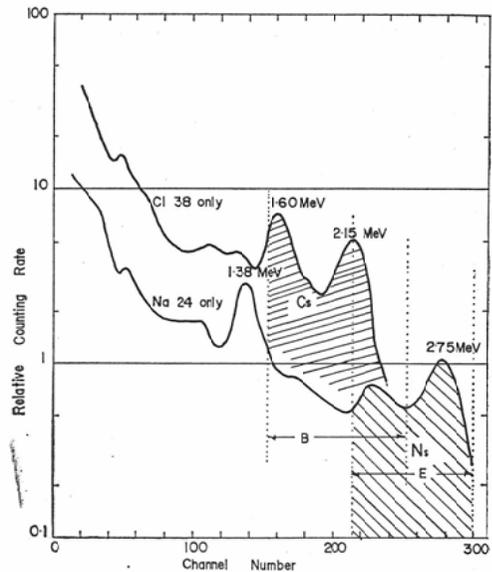
- (1) 20 min. (2) 1 hour (3) 3 hours
(4) 17 hours.



d) ^{24}Na の測定における ^{38}Cl の影響

Fig. 6は生理的食塩水ファントムに中性子を照射して照射後いろいろな経過時間に得られた ^{24}Na + ^{38}Cl のエネルギー・スペクトルを示す。Fig. 7はHCl溶液に中性子を照射したとき、4"φ×4"のNaI(Tl)シンチレータを用いたγ線スペクトロメータで得られた ^{38}Cl のエネルギー・スペクトルを示す。 ^{38}Cl は2本のγ線を放出するがそれらのエネルギーは1.60と2.15 MeVである。これらのγ線はコンプトン散乱成分とあわせて、 ^{24}Na のエネルギー・スペクトルに影響を及ぼす。しかし ^{38}Cl の半減期が37.3分で ^{24}Na の半減期(15時間)に比して著しく短いため、中性子照射後時

Fig. 7. Decay curve for mixture of sodium-24 and chlorine-38 corresponding to Figure 6.

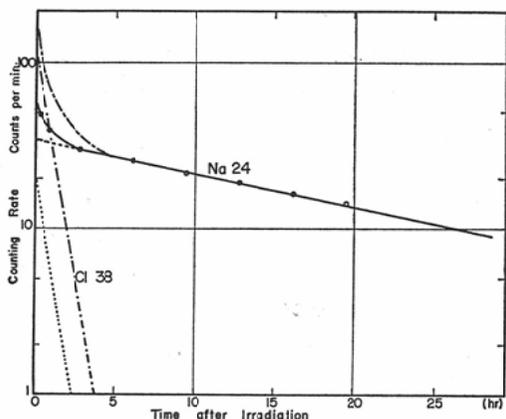


間があつにつれて急激に減少する。人体に含まれるClとNaの原子数にあまり大差なく¹⁰⁾、中性子に対する放射化断面積も両者共500mb程度¹¹⁾であることから、中性子被曝によって人体に生成される ^{38}Cl と ^{24}Na の放射能は被曝時間に左右される。

事故時においては中性子被曝時間は相当に短くおそらく10分以内であろう。事故時の被曝時間を10分として全身に生成される ^{24}Na 量に対する ^{38}Cl 量の比を計算すれば3.4となる。

しかし、本実験の如く60分間の照射では生成される ^{38}Cl 量が飽和に達し、逆に ^{24}Na が多量に生成されるためにこの比は小さくなり、1.4とな

Fig. 8. Typical spectra for sodium-24 and chlorine-38. Cs shows total counts in B-band of chlorine-38 and Ns shows total counts in E band of sodium-24.



る。
 中性子照射時間を60分としたとき、放射化された生理的食塩水について得られたEバンドの計数率はFig. 8の如く時間と共に減少する。図で鎖線は中性子照射時間を10分として計算から推定した曲線である。図から明らかな如く、中性子被曝直後に全身計測を行なった場合にはEバンドの計数率を用いても³⁸Clの影響により数倍も大きく²⁴Na量を評価することになる。³⁸Clの影響を取り除くには被曝後ある程度時間において³⁸Clの崩壊をまつか、Fig. 8の如く²⁴Na+³⁸Clの崩壊曲線を求めて被曝時の³⁸Clと²⁴Na量の比を推定すればよい。しかし、できれば被曝直後²⁴Na量を知ることが望ましい。²⁴Na+³⁸Clによるγ線エネルギー・スペクトルから²⁴Na量を推定するために次の如き補正式が考えられる。

Fig. 7に示す如く²⁴Naだけのスペクトルから得られたB, Eバンドの計数率をそれぞれN_B, N_Eとし、³⁸Clについても同様にC_B, C_Eとする。次に²⁴Na+³⁸Clによるγ線エネルギー・スペクトルでB, Eバンドの計数率をそれぞれS_B, S_Eとし、Eバンドにおける²⁴Naだけによる計数率をN_s, Bバンドにおける³⁸Clだけによる計数率をC_sとする。Bバンドの計数率は²⁴Na

と³⁸Clだけに起因しており、これ以外の核種からの寄与はないとすれば、次式が成立する。

$$S_B = C_s + \left(\frac{N_B}{N_E}\right) N_s \quad \dots\dots\dots(1)$$

同様にして

$$S_E = N_s + \left(\frac{C_E}{C_B}\right) C_s \quad \dots\dots\dots(2)$$

(1), (2)式よりC_sを消去すれば

$$N_s = \frac{S_E - S_B \left(\frac{C_E}{C_B}\right)}{1 - \left(\frac{N_B}{N_E}\right)\left(\frac{C_E}{C_B}\right)} \quad \dots\dots\dots(3)$$

で与えられる。但し、この計算はNaおよびClの体内分布が平衡に達した時の測定において厳密に成立する。

従って、あらかじめ²⁴Na, ³⁸Clを用い、W.B.C.について(N_B/N_E), (C_E/C_B)比を求めておけば、(3)式により³⁸Clの影響を除いて²⁴Na量だけが算出できる。ここで使用した4"φ×4"のNaI(Tl)シンチレータではN_B/N_E=0.83, C_E/C_B=0.36であった。

e) 較正定数

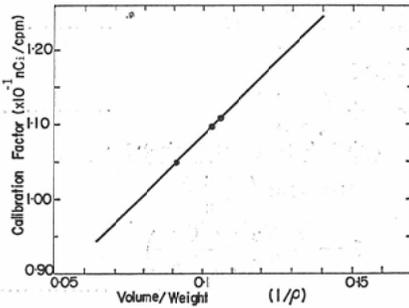
²⁴Naの検出可能量をできるだけ小さくするには最適エネルギー・バンドを用いることが必要で

Table 5. Calibration factor (nCi/cpm) obtained from band E.

Subject	Calibration Factor
T	0.110
S	0.109
Y	0.105
Phantom	0.096

ある。このバンドではγ線バックグラウンドの計数率が小さく、²⁴Naに対する計数率が大きく、さらに³⁸Clなど妨害核種による影響が小さくなければならない。このような条件を考慮すれば、b), c)項でも触れた如くEバンドが²⁴Naの測定に最適と考えられる。成人男性とファントムについて、EバンドにおけるW.B.C.の較正定数(nCi/c.p.m.)を求めると第5表の如くなる。

Fig. 9. Calibration curve ρ indicates the density of the human body.



Na は人体内に一様に分布していると考えられるので、W.B.C. の較正定数と人体密度の間には何らかの関係が予想される。簡単のために人体は胸巾を長径とし、胸厚を短径とする楕円柱と考えて容積を求め、これで体重を除いた値を ρ とする。W.B.C. の較正定数 F と $1/\rho$ との関係は Fig. 9 の如き直線で与えられる。

すなわち、

$$F = 4.0 \times \frac{\pi ab}{W} L + 0.68 \quad \dots\dots(4)$$

である。

ここで W : 体重 (kg), L : 身長 (cm)

$2a$: 胸巾 (cm), $2b$: 胸厚 (cm) とする。

(4) 式は 3 例について求めた実験式であり、理論的根拠にはとぼしいが較正定数を求める場合の目安となろう。

f) 最小検出可能限界

W.B.C. を用いて全身 ^{24}Na 量を測定する場合、Eバンドの計数率を使用するならば、そのバンドの γ 線バックグラウンドの統計的変動から ^{24}Na の最小検出可能量が推定できる。2,000 sec の測定でのバックグラウンドの標準偏差 σ_E は Eバンドで $\sigma_E = 1.16$ となる。従つて $3\sigma_E$ を最小検出可能量とすれば、2,000 sec の測定で約 0.4 nCi と考えられる。

5. 結 言

事故時における被曝中性子線量推定の一環として Na の体内分布と W.B.C. の較正定数について実験的に考察した。

1) 中性子に被曝したとき、人体内に生成される ^{24}Na の体内分布は被曝後 30 分位で平衡に達する。

2) 人体について得られた W.B.C. の較正定数は 1.08 ± 0.05 ($\times 10^{-1}$ nCi/cpm) であり、ファントムのそれは 0.96 ($\times 10^{-1}$ nCi/cpm) であった。両者の較正定数はよく一致しており、 ^{24}Na 量の測定についてはファントムを用いてもほとんど人体と同様の結果が期待されよう。

3) ^{24}Na 量の測定に及ぼす ^{38}Cl の影響は簡単な補正式を用いることにより除去される。

4) この W.B.C. による ^{24}Na の最小検出可能量は 0.4 nCi である。

謝辞: 本研究に際し、御指導いただきました本研究所 橋詰室長、種々御協力を賜りました臨床研究部 田中茂部長、藪本栄三氏に深甚の謝意を表します。

文 献

- 1) L.H. Hempelmann, H. Lisco and J.G. Hoffman: Ann. Int. Med. 36, 279, (1952).
- 2) G.S. Hurst and R.H. Ritchie: ORNL-2748, Part A (1959).
- 3) D.F. Peterson, V.E. Mitchell and W.H. Langham: Health Physics 6, 1~5, (1961).
- 4) G.S. Hurst, R.H. Ritchie and L.C. Emerson: Health Physics 2, 121, (1959).
- 5) I.A.E.A. Technical Report Series No. 6 (1962).
- 6) N. Wald. and G.E. Thoma: ORNL-2748, part B (1961).
- 7) J.W. Smith: Phys. Med. Biol. 7 (3), 341, (1962).
- 8) T. Maruyama (To be published)
- 9) 田中栄一, 野原功全, 応用物理 Vol. 31, No. 11, (1962).
- 10) N.B.S. Handbook 63.
- 11) BNL-325, (1958).