

KEK Internal 2001-7
November 2001
R

高エネルギー加速器施設の遮蔽簡易式と 実効線量換算係数

平山 英夫、義澤 宣明、坂本 幸夫



High Energy Accelerator Research Organization

高エネルギー加速器施設の遮蔽簡易式と 実効線量換算係数

平山 英夫、義澤 宣明¹⁾、坂本 幸夫²⁾

高エネルギー加速器研究機構

¹⁾ 三菱総合研究所

²⁾ 日本原子力研究所

1 はじめに

ICRP 1990 年勧告に基づく放射線障害防止法（以下、障防法）の改訂に伴い遮蔽計算においては「実効線量」で評価する事となった。障防法では、中性子は 20MeV まで、光子は 10MeV までしか実効線量への換算係数が提示されていない。これは、これ以上のエネルギー領域が必要な施設が限られている事が主要な理由となっているが、その背景には、高エネルギー領域のデータそのものが少なく評価者による違いが大きい事と照射条件をどう考えるかという事が難しいという事情がある。

高エネルギー領域における中性子エネルギー依存の実効線量換算係数としてどのような値を採用するかという事についての議論には、関係分野の研究者における議論が必要であると考えられるので、ここでは、「実測に基づく簡易式」に限定して検討を行う事とする。

2 Moyer モデルに基づく簡易式

高エネルギー加速器施設のバルク遮蔽設計においては、「Moyer モデル」に基づく簡易式が使用される事が多い。Moyer モデルは、以下の仮定に基づく簡易式である。

1. 厚い遮へい体中では、中性子のスペクトルは平衡状態となる。
2. 100MeV 以上で中性子の非弾性散乱断面積は最小となり、エネルギーによらず一定となるので、遮へい体中での線量は、これらの 100MeV 以上の中性子により支配されことから、陽子や電子のエネルギーによらず物質により決まる減弱距離により減衰する。
3. 以上の仮定から、厚い遮へい体の外部で測定した線量から遮へい体の無い場合の線量を外挿して求めた値を「線源項」とする。

Moyer モデルは、元々高エネルギー陽子加速器施設の遮蔽計算モデルとして考え出されたものであるが、高エネルギー電子加速器においても、高エネルギー中性子の寄与が大きい事、制動 X 線の減衰も断面積がもっとも小さく“コンプトンミニマム”での減衰係数に支配される事から、同様のモデルに基づく簡易式が作られ使用されている。（Jenkins の式）

Moyer モデルに基づく簡易式では、減弱距離と線源項が最も重要なパラメータであり、基本的に実測値に基づいて求められる。減弱距離は、スペクトルの平衡を仮定しているので「換算係数」の影響を受けるものではない。従って、以下では線源項に対する影響について検討を行う。

3 遮へい体外部での線量測定と換算係数

高エネルギー加速器施設外部での線量測定は、簡単ではない。高エネルギー加速器研究機構で陽子加速器の計算において使用されている線源項は高エネルギー物理学研究所で、電子加速器で使用されている線源項は SLAC で測定されたものであるが、20MeV 以下の中性子はレムカウンターにより、20MeV 以上の中性子の線量は $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$ 反応により測定されたものである。ここで使用されている換算係数は、ICRP-21 である。

また、光子については、照射線量の測定値 (R 単位) を $1\text{R}=0.01\text{Sv}$ として実効線量当量に変換したものである。

4 換算係数の影響

4.1 中性子

中性子の実効線量換算係数は、20MeV 以下と以上で比較の対象が異なる。20MeV 以下では、AP 照射条件に対する換算係数が告示別表 5 に採用されている。この換算係数と ICRP-21 の換算係数の大小関係は、中性子のエネルギーにより変化する。一方、高エネルギー領域は、評価方法

や照射形状により実効線量の値は相当大きく違っているが、ICRP-21の換算係数は、どれよりも大きい値となっている。

この様に、中性子のエネルギーにより大小関係が異なる事から、換算係数だけから評価を行うことは容易ではないので、高エネルギー加速器施設周辺の典型的な中性子スペクトルを選び、種々の換算係数を用いた場合の違いを調べる事により評価を行った。

4.1.1 典型的な中性子スペクトルの計算

KEKにおいて実施された遮蔽実験 [1] での測定場所の中性子スペクトルをモンテカルロ計算コード (HETC-3STEP[2]) 及び一次元ディスクリットオーディネート計算コード (ANISN-JR[3]) で計算した。ANISN での中性子輸送計算の断面積には HILO86R[4] を用いた。

計算体系 実際の実験体系を実形状で模擬することは難しいので、以下に示すような単純化を行った。

1. 線源計算

白金ターゲットから散乱角 (65 - 85 度) に放出される 10MeV 以上の中性子エネルギースペクトルを HETC-3STEP で計算して、コンクリート壁に入射する中性子のエネルギースペクトルとした。ここで、白金ターゲットの大きさは $6\text{mm}\phi \times 40\text{mm}$ で、入射陽子ビームは 12GeV のペンシルビームとした。なお、白金中での中性子の減速は考慮しないこととした。

2. 透過計算

上記 (1) で得られたスペクトルを、無限平板のコンクリートに入射させ、深さ別の中性子エネルギースペクトルを ANISN-JR で計算した。

コンクリート組成 実際の実験では、密度 $3.6\text{-}3.7\text{g/cm}^3$ で含水率 4.6wt%の重コンクリートが用いられた。ただし、その原子個数密度等についての詳細は不明なため、HILO86Rの重コンクリート組成で計算を行い、密度補正して密度 3.65 の重コンクリートに対する cm 単位の厚さに換算した。密度と含水率の違いを表 1 に示す。

表 1 HILO86R と参考文献 [1] のコンクリート密度と含水率

	HILO86R	KEK の実験 [1]
密度 (g/cm^3)	5.27	3.6-3.7
含水量 (wt%)	2.8	4.6

HILO86Rの組成を表 2 に示す。

表 2 HILO86Rの重コンクリート組成 (atoms $10^{24}/\text{cm}^3$)

H	9.9885E-03	Si	3.7264E-02
O	4.3899E-02	Ca	2.2782E-03
Mg	4.3265E-05	Fe	2.3602E-02
Al	1.6502E-04		

比較のために、密度 2.27 の普通コンクリートの場合についても計算を行った。HILO86Rの組成を表 3 に示す。

表3 HILO86Rの普通コンクリート組成 (atoms $10^{24}/\text{cm}^3$)

H	1.3851E-02	Si	1.6621E-02
C	1.1542E-04	K	4.6205E-04
O	4.5921E-02	Ca	1.5025E-03
Mg	1.2388E-04	Fe	3.4510E-04
Al	1.7409E-03		

中性子線源スペクトル 白金ターゲットから放出される中性子線源スペクトルの計算結果を図1に示す。図より、65-85 度に放出されているエネルギーは最大 1GeV 程度であることが分かる。

計算結果 ANISN-JR で計算した重コンクリート中の中性子スペクトルを図2に示す。

4.1.2 中性子換算係数

20MeV 以下の中性子換算係数 20MeV 以下の中性子換算係数は、以下の2つのICRPレポートによることとした。

1. ICRP Publication21[5] 「体外線源からの電離放射線に対する防護のためのデータ」
2. ICRP Publication74[6] 「外部放射線に対する放射線防護に用いるための換算係数」

上記のレポートに示されている主な中性子換算係数の条件を以下に示す。

20MeV 以上の中性子換算係数 20MeV 以上についてはICRP74以外にICRPからデータは発表されていない。本研究では以下の2種類のデータを用いることとした。

発表者	エネルギー (MeV)	照射条件
Yoshizawa et al.[7]	$2.0 \times 10^1 \sim 1.0 \times 10^4$	AP, PA
Ferrari et al.[8]	$2.5 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^7$	AP, PA, LAT, ISO

図3に換算係数データを示す。

なお、ICRP以外の換算係数データについて、20MeV以下は全て対応する照射条件のICRP74のデータを用いて中性子線量を計算することとした。また、ICRP74では200MeVまでのデータのみしか示されていないので、200MeV以上については200MeVの換算係数を使用することとした。

4.1.3 中性子線量の比較

計算で得られた遮蔽体透過後のスペクトルを典型的な中性子スペクトルとし、換算係数データの違いが中性子線量にどの程度影響を与えるかを検討した。

照射条件の検討 照射条件が中性子線量に及ぼす影響を調べるために、ICRP74, Yoshizawa及びFerrariの換算係数データで得られる中性子線量とICRP21で得られる中性子線量の照射条件別の比較結果を図4から図6にそれぞれ示す。図より、全ての換算係数データにおいて、AP条件での線量が最大となることが分かる。

中性子線量への寄与割合 深さ別に、中性子線量へのエネルギー別の寄与を換算係数データ毎に図7から図10に示す。おおむね全ての深さで20MeV以下の中性子が70%程度の割合で全線量に寄与していることが分かる。ついで、20~100MeVの中性子が、20%弱の寄与となっている。

中性子線量の比較 これまでの検討から、AP 照射条件の中性子線量が他の照射条件に比べて大きくなるのが分かった。図 11 に、20MeV 以下の中性子による線量の比較を示す。ICRP21 の換算係数を使用した場合には、重コンクリートの厚さに関係なく、3%程度の過小評価を示している。

図 12 に、20MeV 以上の中性子による線量の比較を示す。図より ICRP21 の換算係数データを用いた場合には、換算係数により若干異なるが、おおむね 6~10%程度の過大評価となることが分かる。

図 13 に、全エネルギー領域の中性子線量の比較を示す。ICRP21 の換算係数を使用した場合、重コンクリート深さ 72cm では、最大で 1%弱の過小評価となっている。一方、144cm 以上ではほぼ同じか過大評価となっている。

普通コンクリートの場合の同様の比較を、図 14 に示す。ICRP21 の換算係数を使用した場合、50cm では 3%程度の過小評価となっているが、100cm 以上では、若干過大評価となっている事が判る。

線源項を求めるための測定には、20MeV 以下ではレムカウンターを使用している。レムカウンターは、ICRP-21 の換算係数が AP 照射条件での実効線量換算係数に比べて小さくなるエネルギー領域で、過大評価となっている事、レムカウンターは、感度は落ちるが、20MeV 以上でも感度を持っている事を考慮すれば、これまで使用してきた線源項の使用により得られる線量は、実効線量を安全側に評価していると言える。

以上の考察においては、高エネルギー陽子により発生する中性子を用いて行ったが、高エネルギー電子加速器においても、100MeV 以上の高エネルギー中性子に作られる平衡状態のスペクトルにより線量が決まる事は陽子の場合と同じであり、上記の結論は、高エネルギー電子加速器に対しても適用できると考えられる。

4.1.4 光子

陽子加速器の場合は、光子の寄与は無視できる程度であるが、高エネルギー電子加速器の場合は、光子の寄与を考慮する事が必要な場合が考えられる。

光子の測定は、R 単位の照射線量の測定値を $1R=0.01Sv$ とした線源項が使用されている。従って、R 単位の照射線量と、実効線量の関係を調べる必要がある。

高エネルギー光子の実効線量については、計算において“カーマ近似¹”を使用するか“電子の輸送を考慮”するかによって値が大きく変わる。各臓器での吸収線量という観点から見れば、“カーマ近似”ではなく“電子の輸送を考慮”した計算にすべきであるが、10MeV までは、その影響が小さいという事からと思われるが、ICRP-74 では“カーマ近似”を用いた結果を採用し、法令にもそのまま取り入れられている。²

測定で使用された照射線量との比較において、どちらを使用すべきかという事が問題となるが、以下の点から“カーマ近似”に基づく実効線量を用いて比較検討を行った。

1. 実効線量そのものとしては、高エネルギー領域では、当然“電子の輸送を考慮”すべきである。
2. 比較の対象となる照射線量も計算上は、“衝突カーマ³”を使用している。
3. 両者の比較という事に限定して考えるならば、“カーマ近似”に基づく実効線量換算係数との比較を行うのが適切である。

10MeV 以上の光子に対する実効線量換算係数 (AP) としては、佐藤 [9] が計算した値を使用した。照射線量の計算に使用するエネルギー吸収係数としては、20MeV までは、Hubbell の最新のデータ [10] を、20MeV から 100MeV までは、1969 年の Hubbell のデータ [11] を使用した。エネルギー吸収係数は、100MeV 以上では電磁カスケードを考慮する必要がでてくるため実用上の意

¹対象領域で光子の反応により発生した電子・陽電子の運動エネルギーが全て対象領域で吸収されると仮定した計算。

²両者の違いは、3MeV からでている。

³対象領域で光子の反応により発生した電子・陽電子の運動エネルギーのから、制動 X 線の発生を起こすエネルギーを差し引いたもの

味を持たないため、値が出されていない。照射線量の計算においては、100MeV以上の光子に対するエネルギー吸収係数は、100MeVでの値と等しいとした。

3GeV電子が、厚さ2.86cm(2放射長)、半径1.48cm(1モリエールユニット)の銅ターゲットの当たった場合、前方及び側面にでてくる光子スペクトルをEGS4[12]で計算し、これを線源として、EGS4を用いて鉛とコンクリート中での実効線量と照射線量を計算し、両者の比較を行った。前方方向には、入射電子の運動エネルギー近くまでの高エネルギー光子が存在するのに対して、側面方向では、30MeV程度までの光子である。

結果を、第15図に示す。100cm未満のコンクリート遮蔽での前方方向を除けば、照射線量 > 実効線量/100が成立しており、 $1R=0.01S_v$ とするならば、照射線量に基づいて求めた線源項は、実効線量を安全側に評価していると言える。

前方方向の100cm未満のコンクリートで、上記が成立していないのは、100MeV以上の光子の寄与が大きいためである。⁴

References

- [1] S. Ban et al., *Nucl. Instr. and Meth.* **174**(1980)271.
- [2] N. Yoshizawa, K. Ishibashi, H. Takada, *J. Nucl. Sci. Technol.* **32**(1995)601.
- [3] K. Koyama et. al., “ANISN-JR, A One-Dimensional Discrete Ordinates Code for Neutron and Gamma-Ray Transport Calculations”, *JAERI-M 6954*(1977).
- [4] H. Kotegawa et al., *JAERI-M 93-020*(1993).
- [5] International Commission on Radiological Protection, *ICRP Publication 21*, Pergamon Press, Oxford (1971).
- [6] International Commission on Radiological Protection, *ICRP Publication 74*, Pergamon Press, Oxford (1996).
- [7] N. Yoshizawa, et al., *J. Nucl. Sci. and Technol.* **35**(1998)928.
- [8] A. Ferrari, et al., *Radiat. Prot. Dosim.* **71**[3](1997)165.
- [9] 佐藤 理、“高エネルギー電子加速器施設からの光子による被曝線量評価に関する研究”，博士学位論文、平成11年3月。
- [10] J. H. Hubbell, and S. M. Seltzer, “Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z=1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest”, *NISTIR-5632* (1995).
- [11] J. H. Hubbell, “Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients, and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV”, *NSRDS-NBS 29* (1969).
- [12] W. R. Nelson, H. Hirayama, D. W. O. Rogers, “The EGS4 Code System”, *SLAC-265* (1985).

⁴エネルギーが高くなると共に、制動放射の寄与が大きくなるが、カーマ近似の実効線量は、制動放射を含めて反応場所で吸収されるとしている。一方、照射線量は、衝突カーマに対応するため制動放射に移行するエネルギーは含まれない。両者の差は、エネルギーが高くなると共に大きくなる。

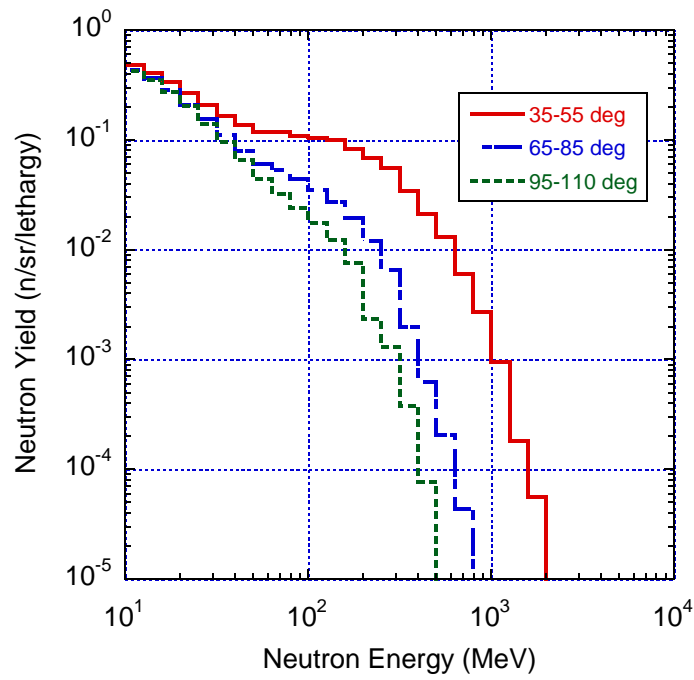


Figure 1: 白金ターゲットに 12GeV 陽子が入射した場合の放出中性子エネルギースペクトル

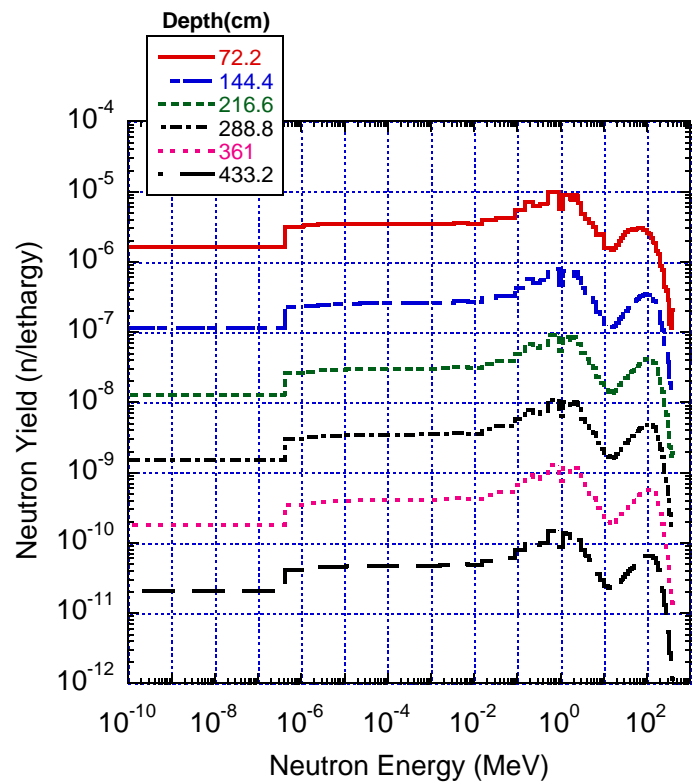


Figure 2: 白金ターゲットから放出 (65-85 度) される中性子の重コンクリート透過中性子スペクトル

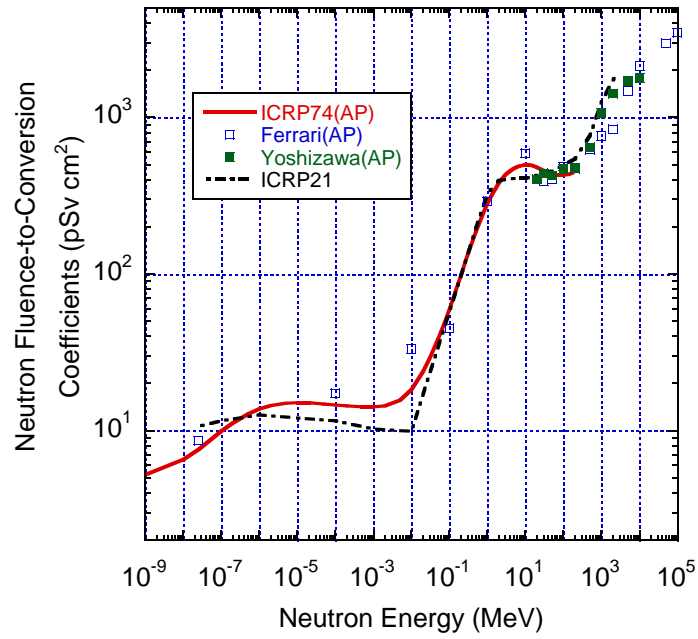


Figure 3: 中性子の線量換算係数

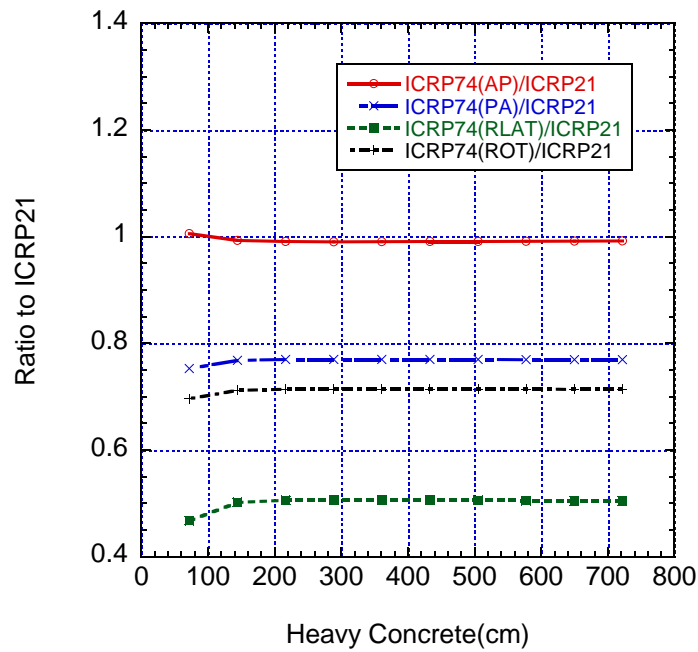


Figure 4: 重コンクリート中での中性子による線量の照射形状別の比較。ICRP21 に対する ICRP74(AP,PA,RLAT,ROT) の比

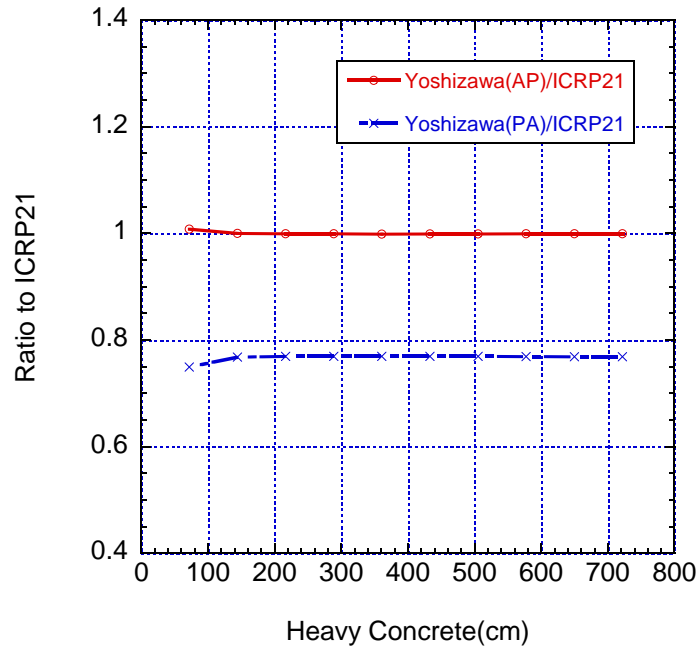


Figure 5: 重コンクリート中での中性子による線量の照射形状別の比較。ICRP21 に対する Yoshizawa の換算係数 (AP,PA) の比

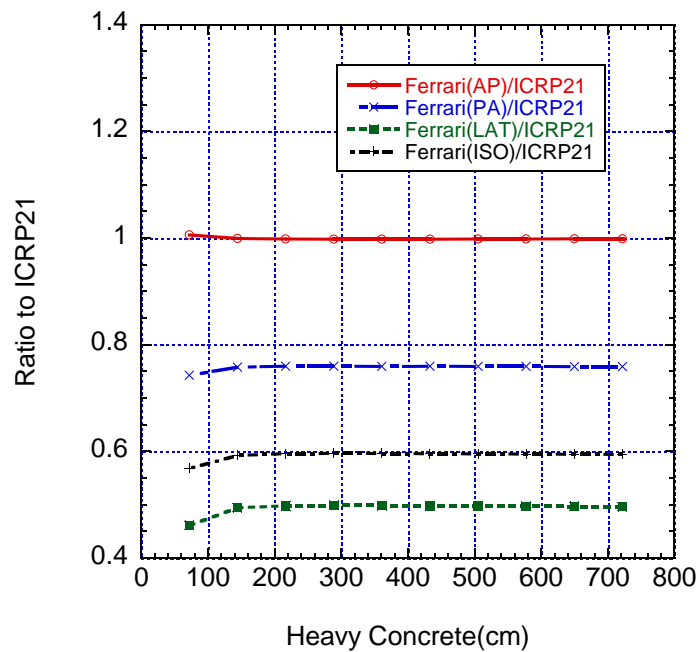


Figure 6: 重コンクリート中での中性子による線量の照射形状別の比較。ICRP21 に対する Ferrari の換算係数 (AP,PA,LAT,ROT) の比

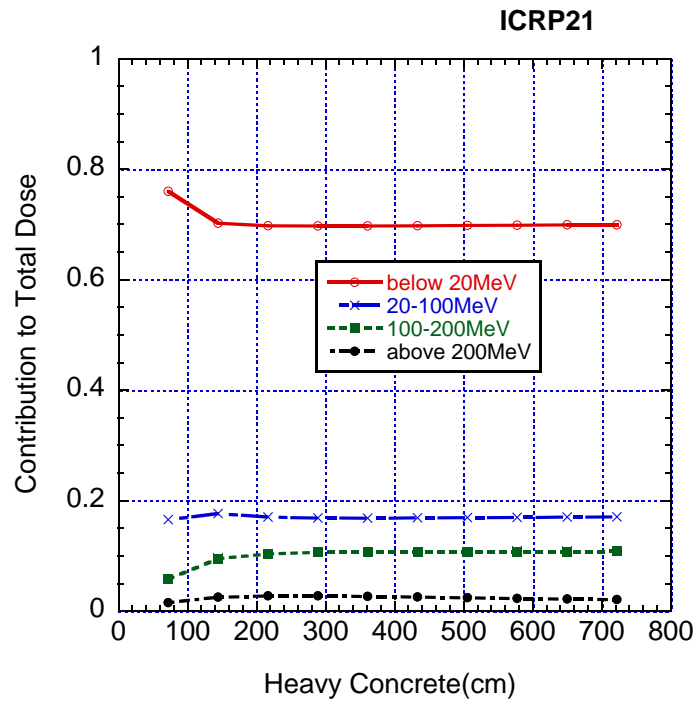


Figure 7: ICRP21 を用いた場合の中性子エネルギーの別全線量への寄与割合

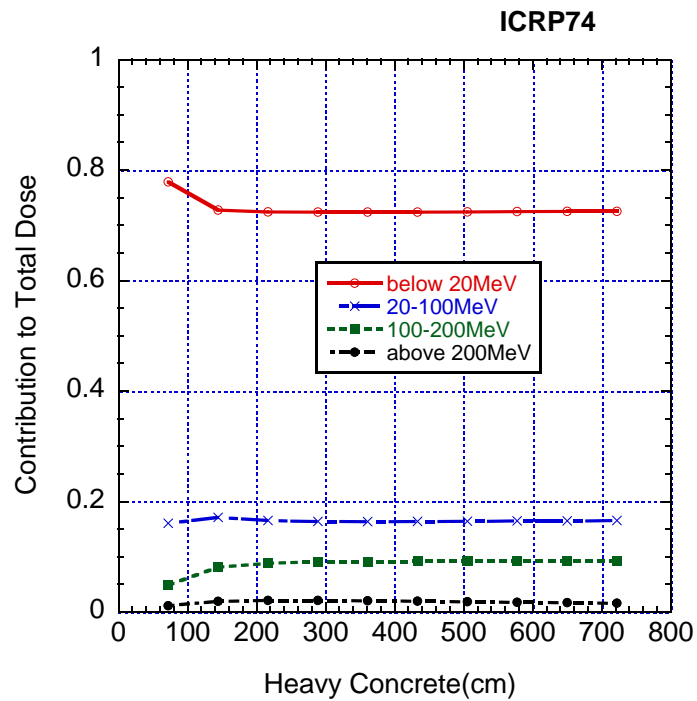


Figure 8: ICRP74 を用いた場合の中性子エネルギーの別全線量への寄与割合

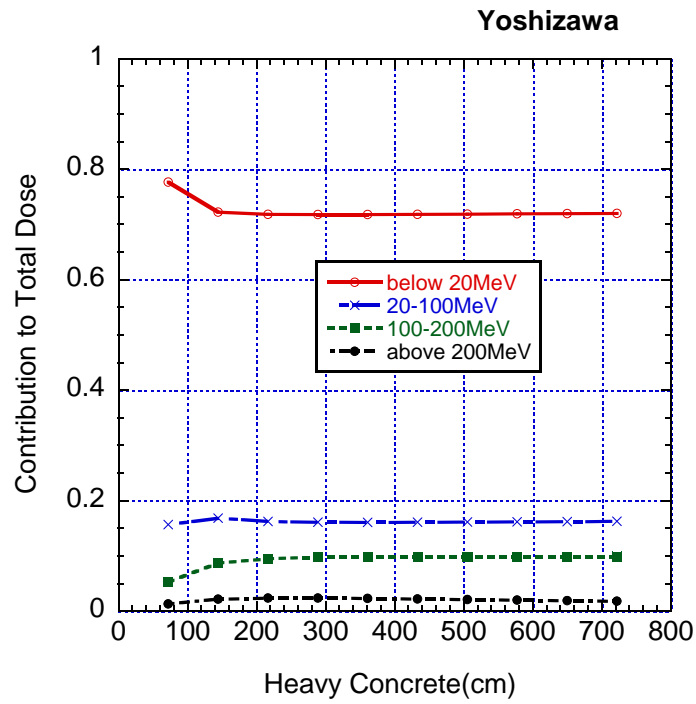


Figure 9: Yoshizawa の換算係数を用いた場合の中性子エネルギーの別全線量への寄与割合

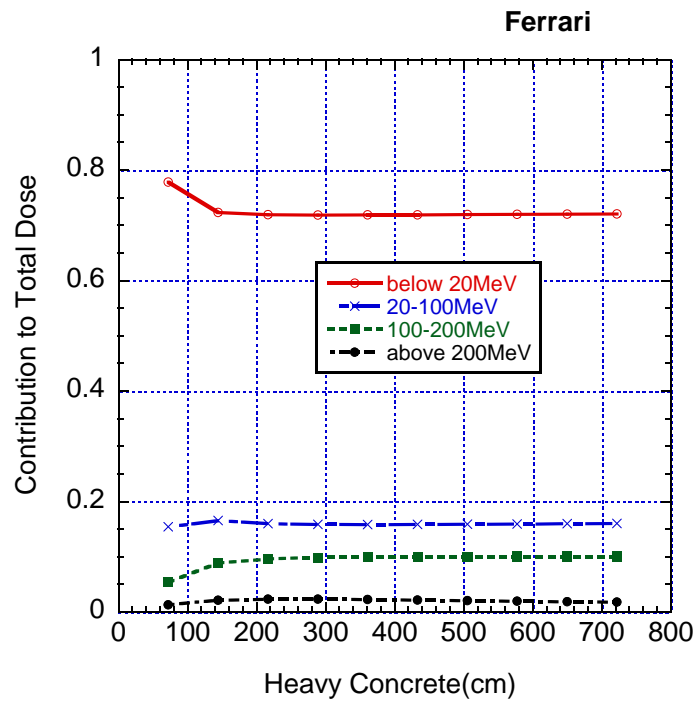


Figure 10: Ferrari の換算係数を用いた場合の中性子エネルギーの別全線量への寄与割合

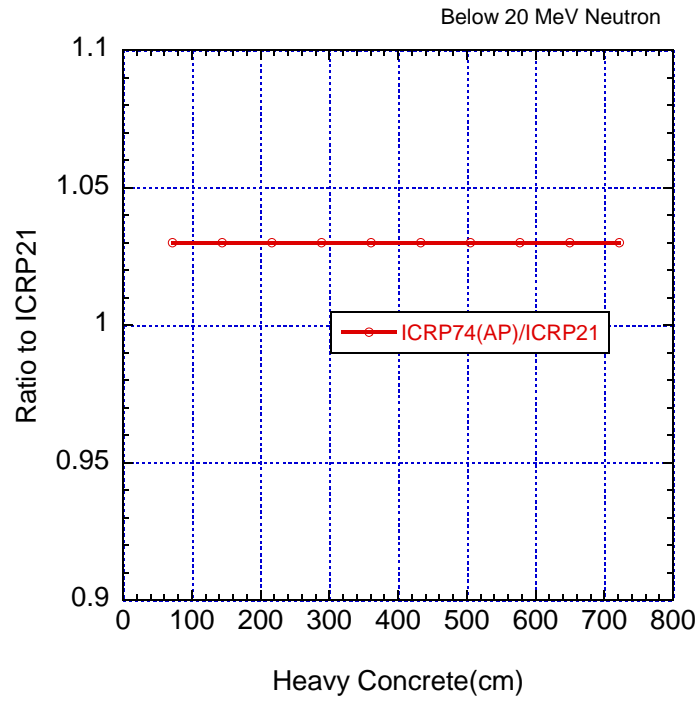


Figure 11: 重コンクリート中 20MeV 以下の中性子による線量の比較。ICRP-21 による線量に対する ICRP74(AP) の線量の比

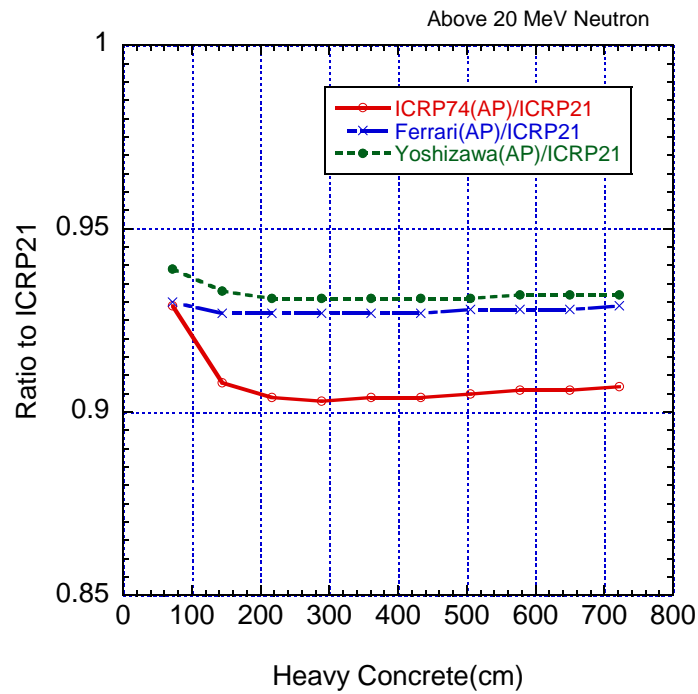


Figure 12: 重コンクリート中 20MeV 以上の中性子による線量の比較。ICRP-21 による線量に対する線量の比

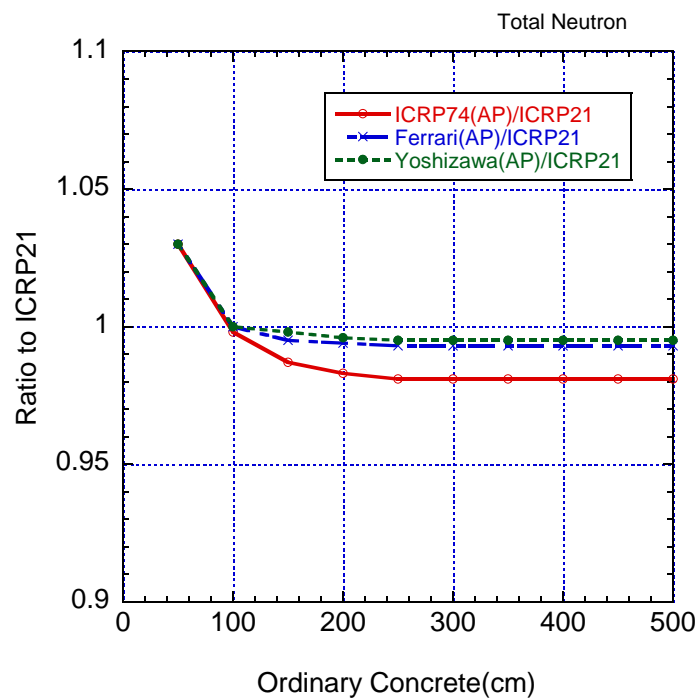
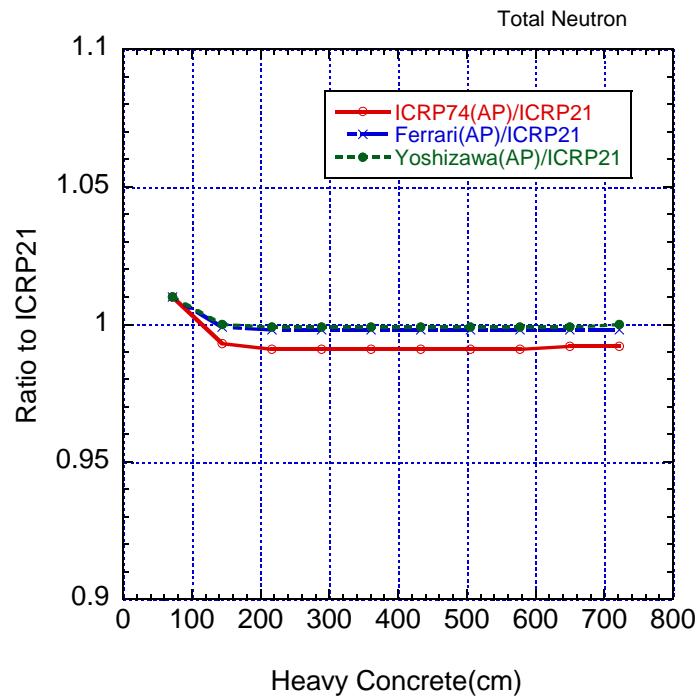


Figure 13: コンクリート中での中性子による線量の比較。ICRP-21 による線量に対する線量の比

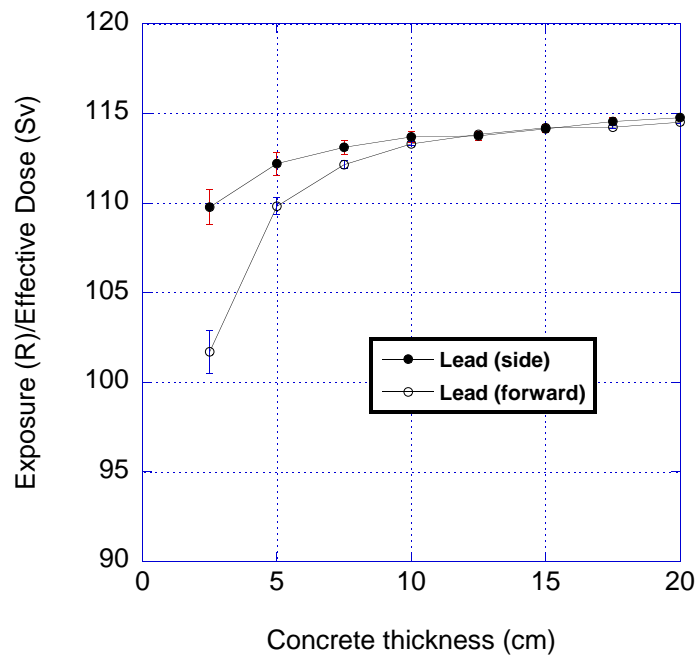
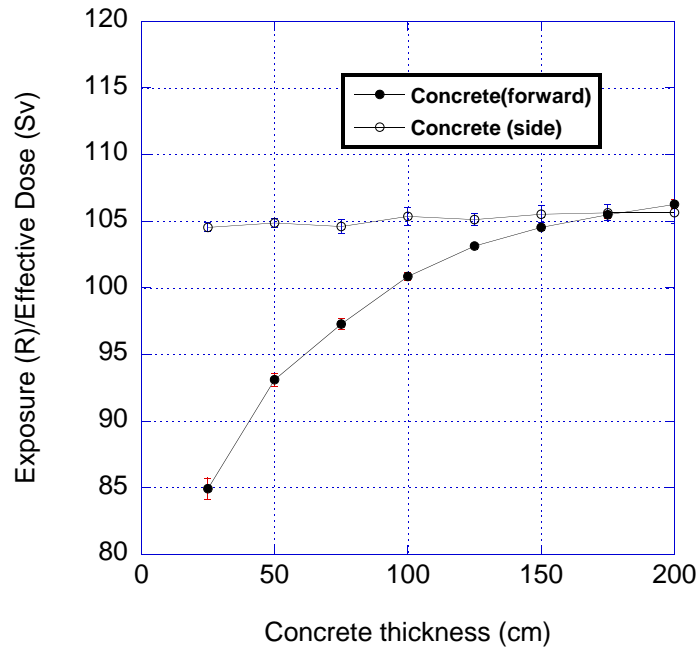


Figure 14: コンクリート及び鉛中の実効線量と照射線量の比較