

JAERI-M

7288

スカイシャイン計算コード評価のための
標準問題

1977年9月

田中 俊一・笹本 宣雄

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

スカイシャイン計算コード評価のための標準問題

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

田中 俊一・笹本 宣雄

(1977年8月24日受理)

ガンマ線や中性子のスカイシャインに関する実験を調査、検討し、スカイシャイン計算コードの計算手法や計算精度の検証に役立つと判断された実験からベンチマーク問題を作成した。

本報告書では、核分裂中性子、 ^{60}Co ガンマ線、それにd-T中性子を線源としたAir-over-Ground二次元体系での3種類のスカイシャイン問題がとり上げられた。それぞれの問題ごとに、ガンマ線や中性子の線量率分布、エネルギースペクトル、線量率の角度分布等の測定値、実験配置、線源条件、物質の組成、測定方法や測定器のレスポンスなど計算コードの検証に必要なデータがすべて与えられている。

Problems for Evaluation of the Skyshine
Calculation Code

Shun-ichi TANAKA and Nobuo SASAMOTO

Division of Reactor Engineering,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received August 24, 1977)

Benchmark problems are presented for evaluation of calculation method and accuracy of the skyshine code for gamma rays and neutrons. The problems were made from experiments using fission source, ^{60}Co gamma-ray source and d-T neutron source with the configuration of air-over-ground geometry. Informations necessary for neutron and/or gamma-ray transport calculations, experimental configuration, source conditions, material compositions, method of measurement and detector responses are given with experimental results of spatial neutron and gamma-ray dose distributions, energy spectra, and angular distributions of neutron and gamma-ray doses.

Keywords : Skyshine, Benchmark Problem, Neutron, Gamma rays,
Transport Code

目 次

1. 序 論	1
2. スカイラインベンチマーク問題—その 1	2
2.1 実験配置	2
2.2 線 源	2
2.3 測定方法と測定器	2
2.4 測定値	3
2.5 計算条件	3
2.5.1 線源条件	3
2.5.2 領域の組成	3
3. スカイラインベンチマーク問題—その 2	11
3.1 実験配置	11
3.2 線 源	11
3.3 測定方法と測定器	11
3.4 測定値	11
3.5 計算条件	12
3.5.1 線源条件	12
3.5.2 領域の組成	12
4. スカイラインベンチマーク問題—その 3	16
4.1 実験配置	16
4.2 線 源	16
4.3 測定方法と測定器	17
4.4 測定値	17
4.5 計算条件	18
4.5.1 線源条件	18
4.5.2 領域の組成	18
5. まとめ	28
謝 辞	28
参考文献	29

1. 序 論

原子炉や各種加速器，それに多くの放射線取扱い施設では，しばしばガンマ線や中性子の空気散乱，いわゆるスカイシャイン (Skyshine) が問題になる。特に，最近ALAP等の関係でスカイシャインの評価が安全審査で問題になり，各種施設からのスカイシャインによる線量を正しく評価する方法を確立することが緊急の課題となっている。しかしながら，ガンマ線や中性子のスカイシャインを精度よく扱うことは次のような理由から一般に容易でない。

- i) 二次元あるいは三次元形状の非常に大きい体系でのガンマ線や中性子の挙動を扱う必要がある。
- ii) 空気のように平均自由行程の非常に大きい物質や空気と土壌のように平均自由行程の非常に違う物質内でのガンマ線や中性子の挙動を扱う必要がある。
- iii) スカイシャインでは，一般に数値解法上，正しい扱いが難しい後方散乱線が非常に重要な役割をもつ。

これまで，数多くのスカイシャイン計算コードが開発されてきたが，いずれの計算コードも上記のような問題点について十分な検討がなされておらず，今のところ，計算手法や計算精度についての検証はほとんど行われていないといつてよい。これはスカイシャインの実験の実施が極めて困難で，計算コードの検証に適した実験が容易に行えないのが最大の理由で，特に，我国のような情勢下で大規模なスカイシャインの実験を行うことは今後とも不可能に近いと考えられる。

こうした点を考慮すれば，これまで報告されているガンマ線や中性子のスカイシャインに関する実験を調査，検討し，スカイシャイン計算コードの計算手法や計算精度の評価に役立つベンチマーク問題を作成することは重要かつ緊急を要する課題であり，本報告書の目的はこの点にある。

ところで，これまでのスカイシャインの研究は，大部分が計算手法に関するもので，実験の報告書はそう多くない。各種の高エネルギー粒子加速器などの性能試験という形で行われた測定例は幾つか見受けられるが，ガンマ線や中性子のスカイシャインを系統的に研究する目的で行われた実験は非常に少なく，米国ORNLのTSF (Tower Shielding Facility) を使って行われた実験¹⁾とNevada Test Siteで，原子炉，⁶⁰Coガンマ線およびd-T加速器を使って行われた一連の実験が代表的なものである。

とりわけ，Nevada Test Siteでの一連の実験は" BREN-Operation "および" HENRE-Operation "と呼ばれ，1956年から約15年の歳月を要して行われたガンマ線および中性子のスカイシャイン実験で，今日に致るまでこれに類する実験は行われていない。特に，この一連の実験では，実験配置，線源条件 (組成，形状，線源強度，エネルギースペクトル，角度分布)，空気や土壌の組成，測定方法や測定器のレスポンスなど，計算コードの入力データとして必要なすべての情報が与えられていること，また，核分裂中性子，⁶⁰Coガンマ線，14 MeV中性子を線源として，ガンマ線や中性子の線量率が広範囲で得られており，しかも，エネルギースペク

トルや線量率の角度分布など計算コードの検証に役立つ多くの測定が行われている。

本報告書で提案されたベンチマーク問題は、Nevada Test Site での一連の実験にもとづいており、3種類の線源に対応して、Air-over-Ground 二次元形状でのスカイシャイン問題が作成された。

なお、一次元の無限空間でのスカイシャインのベンチマーク問題はORNL-RSIC-25²⁾にまとめられている。

2. スカイシャインベンチマーク問題—その1³⁻⁶⁾

—核分裂中性子源—

2.1 実験配置

全体の実験配置を Fig. 2.1 に示す。図に示したように、Nevada Test Site の地表面はほぼ平坦で広大な大地である。核分裂中性子源 (Bare Reactor Experiment Nevada - BREX) である原子炉を地表面から H_S の高さに設置し、地表面からの高さ H_D での中性子線量率が線源からの距離 (Slant Range : R_S) の関数として測定された。Fig. 2.2 は中性子線量率の角度分布測定の略図を示すもので、BREX Tower と Collimator Station の軸を含む平面 (A) とこの平面に直角に交わり、その交線が BREX 線源と Collimator を結ぶ平面 (B) の2つの面で角度分布が測定された。なお、A, B 両面の交線が Polar angle ϕ (A 面) と Lateral angle θ (B 面) の零度として定義された。

2.2 線源

Fig. 2.3 が BREX 原子炉の全体図で、これが BREX Tower のホイストに取り付けられ、所定の高さ (H_S) まで引き上げられ核分裂中性子源として利用された。Fig. 2.4 は BREX 原子炉の炉心部分を拡大したもので、別名 HPBR (Health Physics Research Reactor) と呼ばれ、ORNL 研究所で保健物理の研究に利用されていた。この HPBR 炉心は出力分布の平坦化のため、中心に $5.08\text{cm}\phi$ の Stainless Steel (SUS) core を有し、その周囲に外径 $20.32\text{cm}\phi$ の U-Mo 合金燃料が配置されている。この合金燃料は、U が 90wt% (^{235}U : 93.14% 濃縮)、Mo が 10wt% の組成を有している。炉心の中には各種の制御棒や Safety Block があるが、これらはすべて同組成の U-Mo 合金でできている。なお、炉心以外の構造物はすべて Stainless Steel で作られている。

2.3 測定方法と測定器

中性子の吸収線量が ORNL-Q-1995 型 Radsan 検出器⁷⁻⁹⁾によって測定された。この

トルや線量率の角度分布など計算コードの検証に役立つ多くの測定が行われている。

本報告書で提案されたベンチマーク問題は、Nevada Test Site での一連の実験にもとづいており、3種類の線源に対応して、Air-over-Ground 二次元形状でのスカイシャイン問題が作成された。

なお、一次元の無限空間でのスカイシャインのベンチマーク問題はORNL-RSIC-25²⁾にまとめられている。

2. スカイシャインベンチマーク問題—その1³⁻⁶⁾

—核分裂中性子源—

2.1 実験配置

全体の実験配置を Fig. 2.1 に示す。図に示したように、Nevada Test Site の地表面はほぼ平坦で広大な大地である。核分裂中性子源 (Bare Reactor Experiment Nevada - BREX) である原子炉を地表面から H_s の高さに設置し、地表面からの高さ H_D での中性子線量率が線源からの距離 (Slant Range : R_s) の関数として測定された。Fig. 2.2 は中性子線量率の角度分布測定の略図を示すもので、BREX Tower と Collimator Station の軸を含む平面 (A) とこの平面に直角に交わり、その交線が BREX 線源と Collimator を結ぶ平面 (B) の2つの面で角度分布が測定された。なお、A, B 両面の交線が Polar angle ϕ (A面) と Lateral angle θ (B面) の零度として定義された。

2.2 線源

Fig. 2.3 が BREX 原子炉の全体図で、これが BREX Tower のホイストに取り付けられ、所定の高さ (H_s) まで引き上げられ核分裂中性子源として利用された。Fig. 2.4 は BREX 原子炉の炉心部分を拡大したもので、別名 HPBR (Health Physics Research Reactor) と呼ばれ、ORNL 研究所で保健物理の研究に利用されていた。この HPBR 炉心は出力分布の平坦化のため、中心に $5.08\text{cm}\phi$ の Stainless Steel (SUS) core を有し、その周囲に外径 $20.32\text{cm}\phi$ の U-Mo 合金燃料が配置されている。この合金燃料は、U が 90wt% (^{235}U : 93.14% 濃縮)、Mo が 10wt% の組成を有している。炉心の中には各種の制御棒や Safety Block があるが、これらはすべて同組成の U-Mo 合金でできている。なお、炉心以外の構造物はすべて Stainless Steel で作られている。

2.3 測定方法と測定器

中性子の吸収線量が ORNL-Q-1995 型 Radsan 検出器⁷⁻⁹⁾によって測定された。この

測定器は C_nH_{2n} 組成の反跳陽子比例計数管 (Hurst Counter) で、この検出器で得られた測定値が Tissue に対する中性子の吸収線量になるように工夫されたのが Radsan 検出器である。したがって、Radsan 検出器で得られた測定値は、Fig. 2.5 に示した "Fluence to Dose Conversion Factor"¹⁰⁾ を用いて入射中性子束と関係づけられる。なお、Radsan 検出器では約 0.1 MeV 以上の中性子が測定された。

2.4 測定値

Fig. 2.6 から Fig. 2.8 はそれぞれの配置での Slant Range に関する中性子の吸収線量率分布である。

Fig. 2.9 と Fig. 2.10 は地表面から 342.9 m の高さに BREN 炉を設置し、 X_D が 685.8 m の地点 ($R_s = 770.8$ m に相当) で、地表面から 152.4 m の位置で測定した中性子の吸収線量率の角度分布で、Fig. 2.9 は $\theta = 0^\circ$ での Polar Angle (ϕ) に関する分布で、Fig. 2.10 は $\phi = 0^\circ$ での Lateral angle (θ) に関する分布である。これらの図で Acceptance angle は、角度分布の測定に使用した Collimator の開き角を意味し、Fig. 2.9, Fig. 2.10 の角度の測定誤差はこの開き角に相当している。

以上の測定は、大気圧 643.1 mm Hg, 温度 291.2°K (空気密度 $\rho_{air} = 1.02$ mg/cm³) での値に規格化され、さらに Fig. 2.6 から Fig. 2.8 の中性子線量率は原子炉出力 (watt) で規格化し、 $4\pi R_s^2$ を掛けた値で表らわされている。

2.5 計算条件

2.5.1 線源条件

Fig. 2.3 を参考にして、炉心以外の原子炉構造物を無視して Fig. 2.11 の形状で炉心を近似するか、あるいは原子炉構造物の Drive Mechanism の部分が 1/10 密度の Stainless Steel で近似し、Fig. 2.12 のように原子炉全体を近似することが考えられる。ただし、Drive Mechanism の密度を 1/10 としたのは、参考文献 3) の写真と図から予測したもので、十分な根拠にもとづくものでない。

原子炉からの中性子スペクトルは、炉心の U-Mo 合金燃料の領域で一様に核分裂が起るとし、この時の核分裂スペクトルは ^{235}U の核分裂中性子スペクトルを仮定する。こういった仮定を行うことによって、単位炉出力あたりの中性子発生量は 7.66×10^{10} neutron となる。

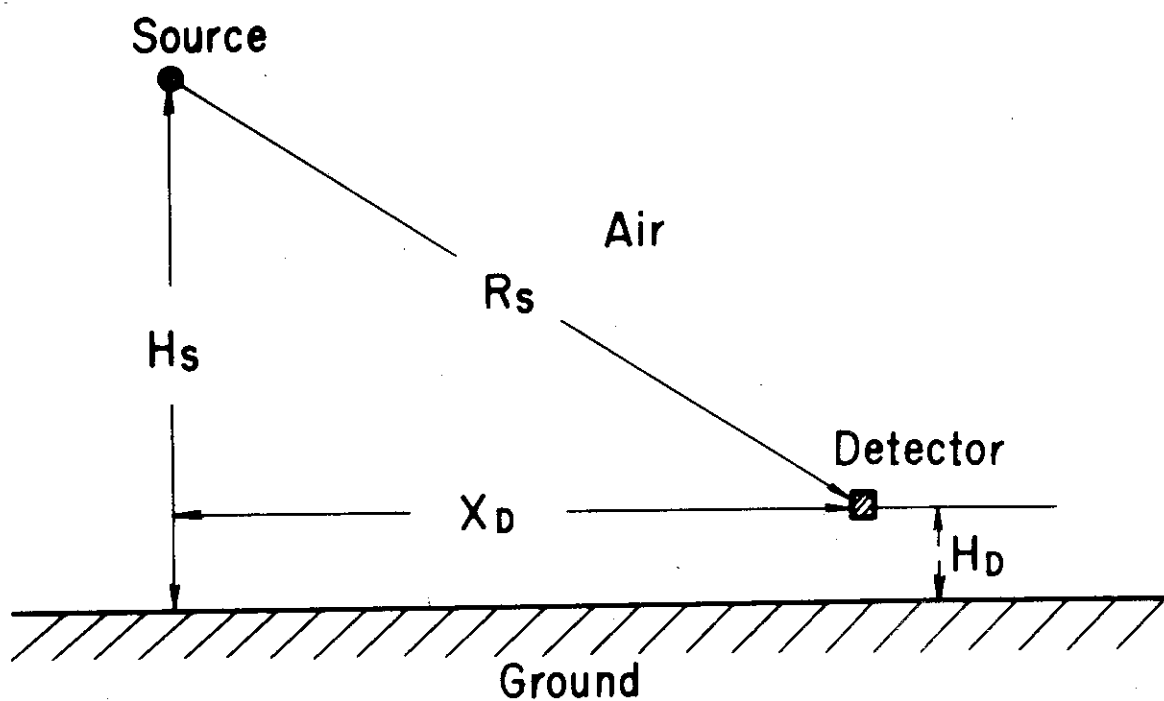
2.5.2 領域の組成

Nevada Test Site の Ground の組成は Table 2.1 に示した¹¹⁾ これ以外の領域の組成は次の通りである。

Region	Nuclide	Atomic Density (atoms/cm ³)
U-Mo	²³⁵ U	4.02×10^{22}
	²³⁸ U	2.92×10^{21}
	Mo	6.40×10^{21}
SUS-Core ($\rho = 7.9 \text{ g/cm}^3$)	Fe	5.79×10^{22}
	Cr	1.74×10^{22}
	Ni	8.10×10^{21}
	Mn	1.73×10^{21}
	Si	1.69×10^{21}
Air ($\rho = 1.02 \text{ mg/cm}^3$)	N	3.36×10^{19}
	O	8.93×10^{18}

Table 2.1 Compositions of the Soil at Nevada Test Site

Nuclide	Material ($\times 10^{21}$ atoms/cm ³)		
	Dry NTS soil	50 % sat. NTS soil	100 % sat. NTS soil
H	8.553	9.820	16.87
O	22.68	23.30	27.00
Al	2.014	1.830	1.976
Si	9.533	8.680	8.963
Density (g/cm ³)	1.15	1.12	1.25



H_s : Reactor Height (Source Height)
 X_D : Horizontal Separation (Lateral Range)
 H_D : Detector Height
 R_s : Slant Range

Fig.2.1 Experimental Configuration for Operation-BREN and Operation-HENRE.

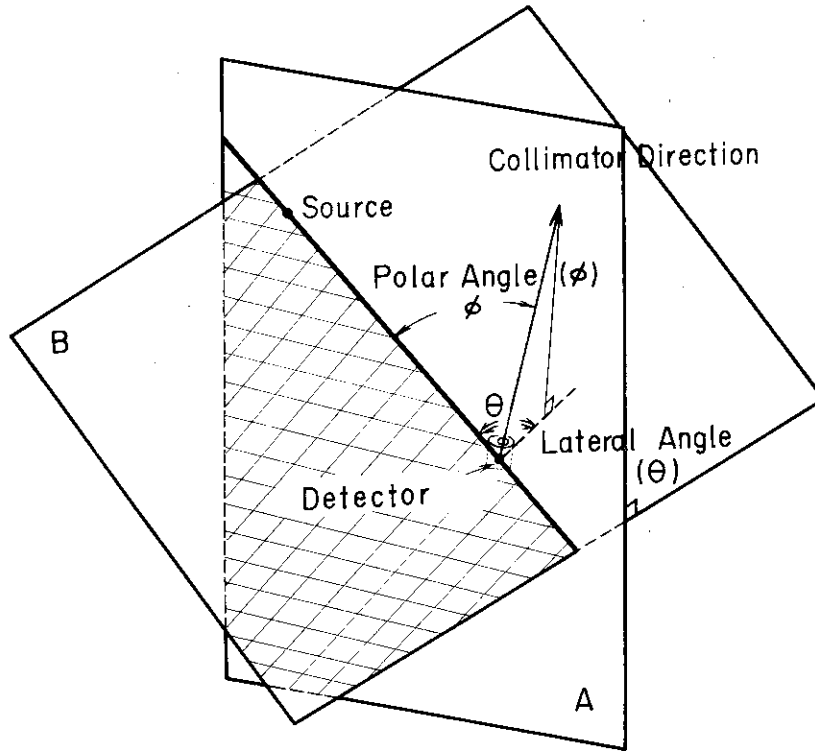


Fig.2.2 Experimental Configuration for Angular Dose Measurements.

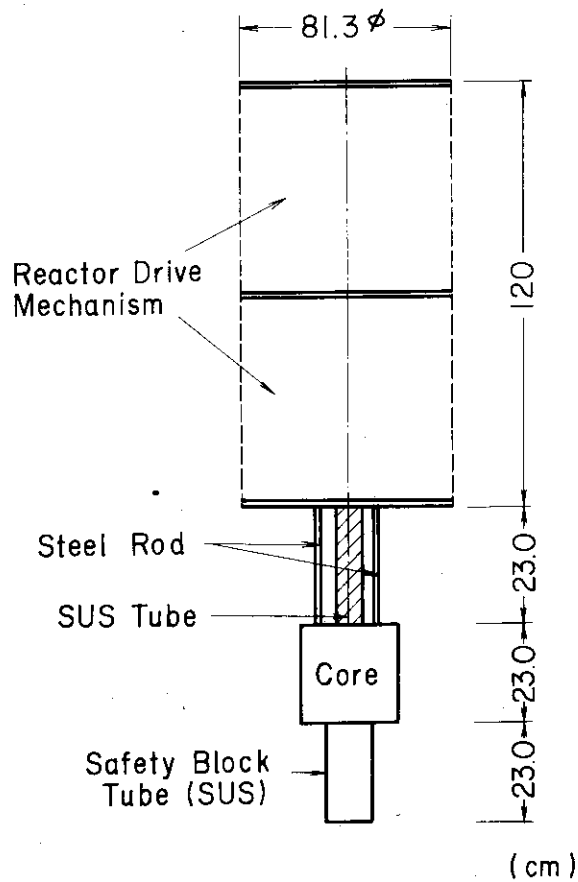


Fig.2.3 Schematic View of BREN Reactor.

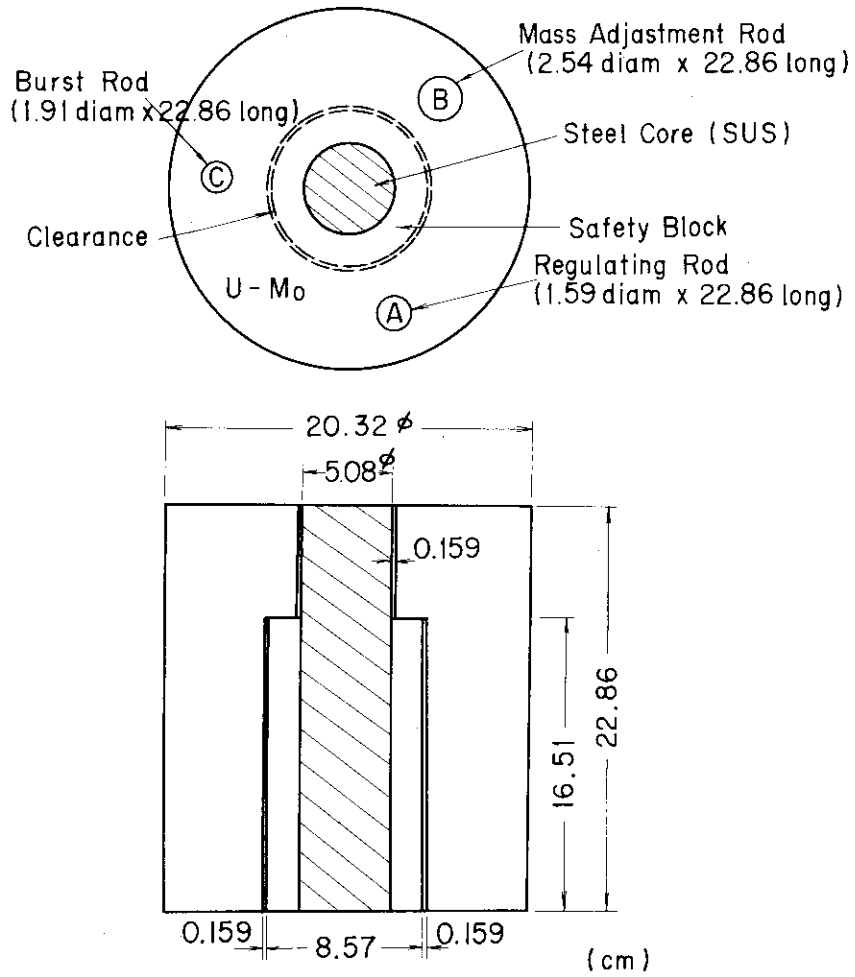


Fig.2.4 Cross Sectional Showing of BREN Reactor Core.

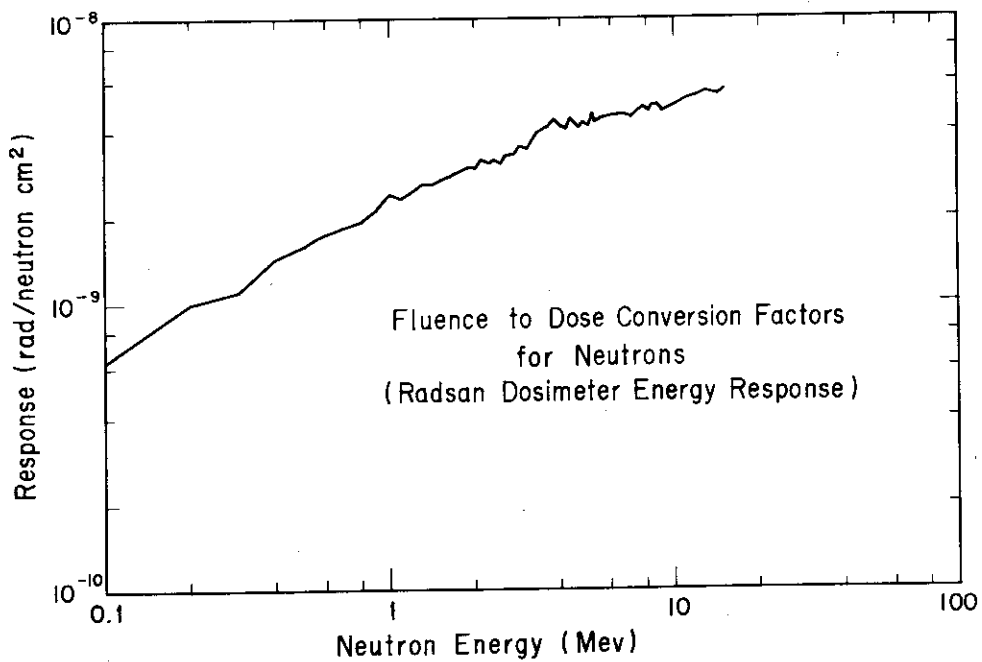


Fig.2.5 Fluence to Dose Conversion Factors for Neutrons in Soft Tissue.

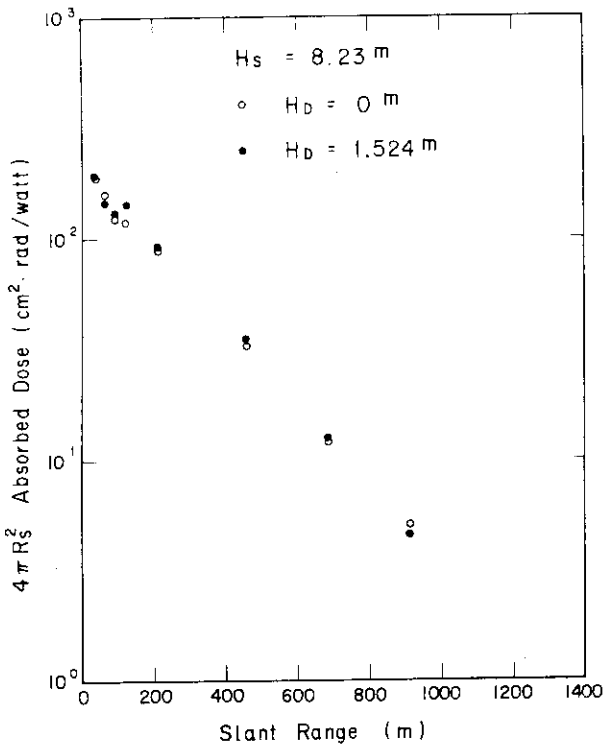


Fig. 2.6 Spatial Neutron Dose Distributions with Detector Heights of 0 m and 1.524 m and Source Height of 8.23 m.

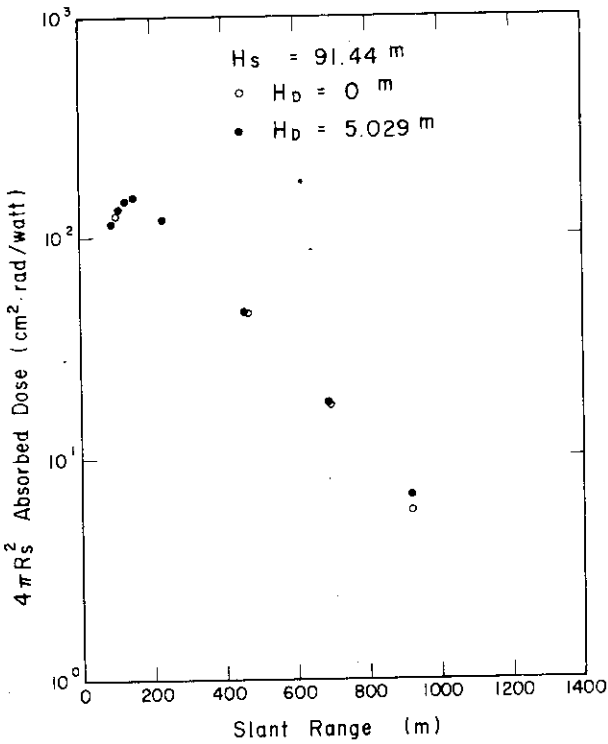


Fig. 2.7 Spatial Neutron Dose Distributions with Detector Heights of 0 m and 5.029 m and Source Height of 91.44 m.

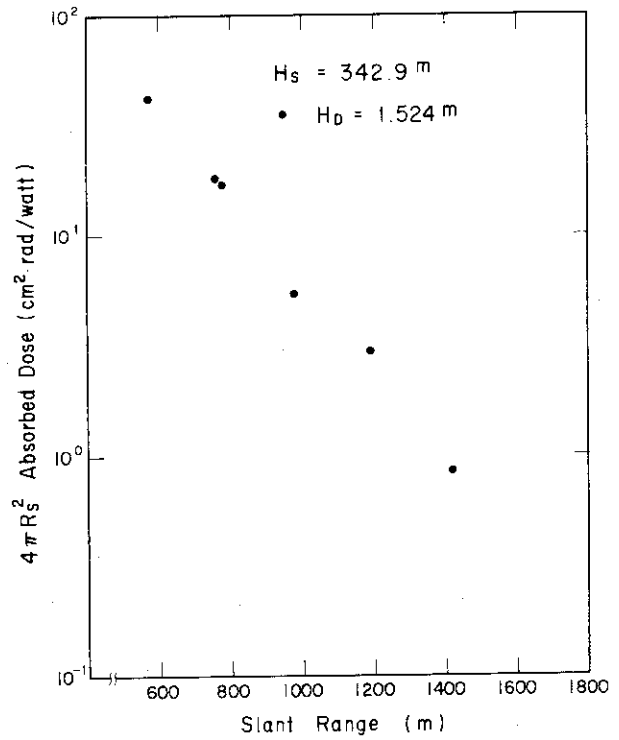


Fig. 2.8 Spatial Neutron Dose Distributions with Detector Height of 1.524 m and Source Height of 342.9 m.

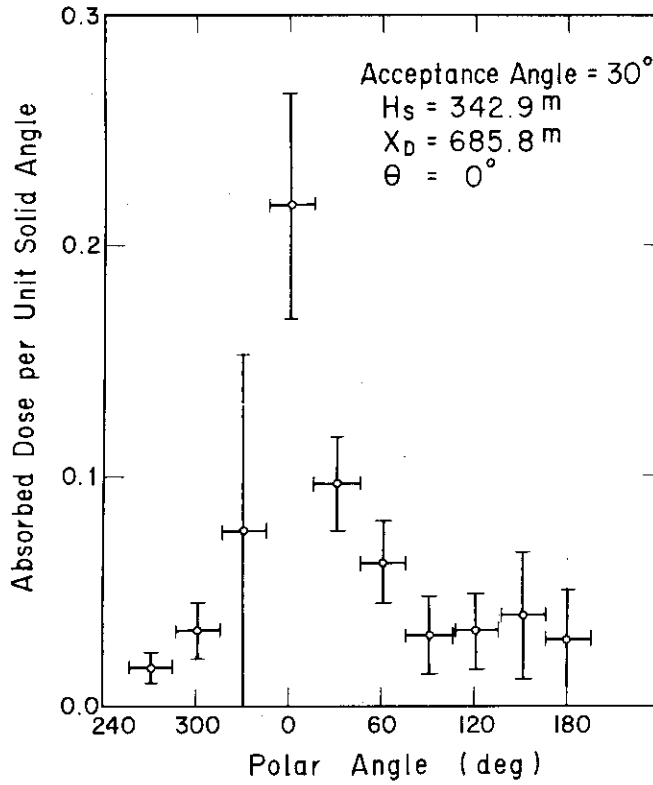


Fig.2.9 Angular Neutron Dose as a Function of Polar Angle.

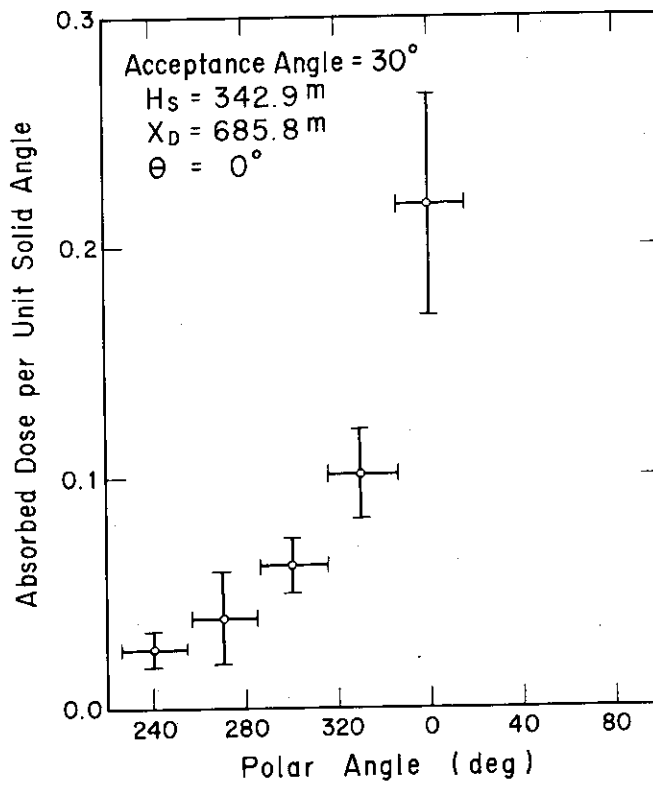


Fig.2.10 Angular Neutron Dose as a Function of Lateral Angle.

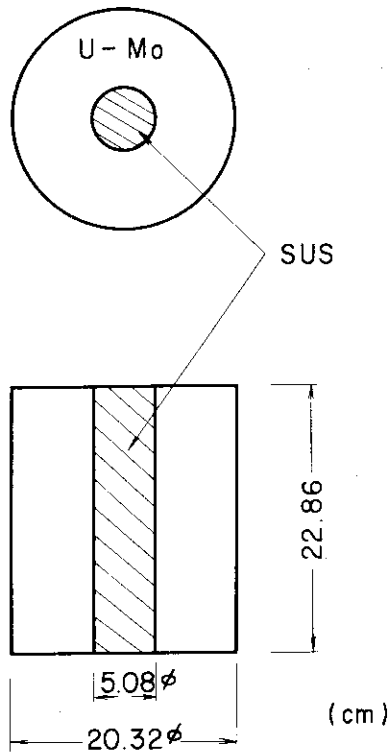


Fig.2.11 Calculation Model of BREN Reactor Core.

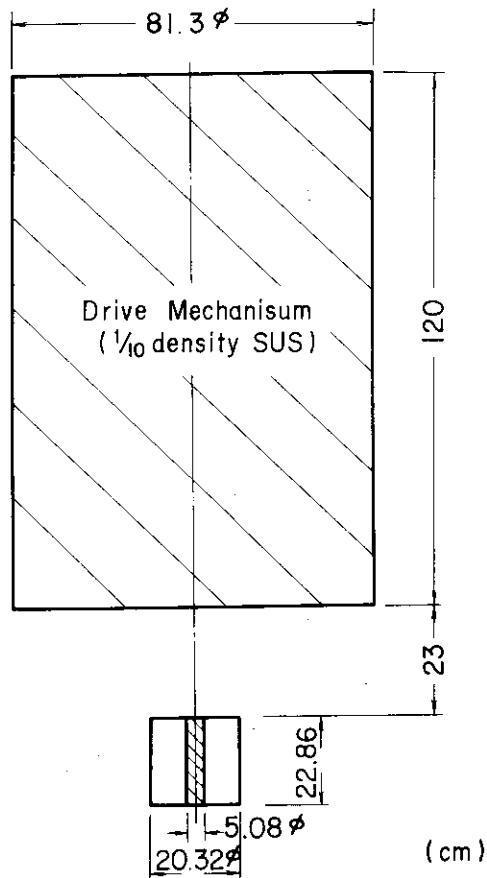


Fig.2.12 Calculation Model of BREN Reactor.

3. スカイシャインベンチマーク問題³⁻⁶⁾ ⁶⁰Co ガンマ線線源

3.1 実験配置

全体の実験配置は、2.1節で述べたFig. 2.1で線源がBREN原子炉に代って、800Ciの⁶⁰Coガンマ線線源に変っただけで、他はすべて同じである。地表面から H_S の高さに⁶⁰Coガンマ線線源を設置し、地表面からの高さ H_D でのガンマ線の照射線量率が、Slant Range(R_S)の関数として測定された。また、ガンマ線の照射線量率の角度分布もFig. 2.2に示した配置で測定された。

3.2 線源

Fig. 3.1が⁶⁰Coガンマ線線源およびその駆動装置と線源容器の全体図で、これがBREN実験に使用したTowerのホイストに取付けられ、所定の高さ(H_S)まで引き上げられガンマ線線源として利用された。Fig. 3.1は鉛製の線源容器から線源が引き出された状態、つまり測定中の状態を示している。⁶⁰Co線源はFig. 3.1の拡大図に示したように、 $2.54\phi \times 8.9\text{cm}$ のStainless Tubeの中に⁶⁰Co線源が並べられており、全体で800Ciの強さを有している。

3.3 測定方法と測定器

ガンマ線の照射線量(Exposure Dose)がPhil線量計¹²⁾で測定された。これはNe, ArおよびハロゲンQuenching Gasを封入したPhilips No.18509型Geiger-Mueller計数管で、Tubeの外側を0.135cm厚のスズと0.0254cm厚の鉛で覆うことによって0.15MeVから3MeVのガンマ線に対するエネルギーレスポンスが空気のレスポンスに比例するように工夫されている。

3.4 測定値

Fig. 3.2からFig. 3.4はそれぞれの配置でのガンマ線の照射線量率の分布をSlant Rangeの関数で表したものである。Fig. 3.4のDetector Height 1.524mでの測定値の変動は線源容器やTower基部の影響と考えられる。Fig. 3.5は線源が地上342.9mの高さにある時の $X_D=685.8\text{m}$ ($R_S=770.8\text{m}$ に相当)の地点の地上1.524mでの照射線量率の角度分布で、 $\theta=0^\circ$ でのPolar Angle(ϕ)に関する分布である。なお、角度分布の測定に用いたCollimatorの開き角(Acceptance Angle)は 10° である。

以上の測定値は、空気密度が $1.02\text{mg}/\text{cm}^3$ の値であり、Fig. 3.2からFig. 3.4の照射線量率

は800Ciの ^{60}Co ガンマ線当りの値に $4\pi R_s^2$ を掛けたものである。

3.5 計算条件

3.5.1 線源条件

Fig. 3.6はFig. 3.1の全体図で、鉛製の線源容器と鉛プラグ以外の部分を見せ、 ^{60}Co 線源を点等方線源として近似した場合の図である。線源以外の線源容器とプラグ以外の部分を見せ、空気に ^{60}Co 線源のみがあるという近似も考えられる。

^{60}Co は1Ciあたり毎秒 3.7×10^{10} 個の1,332MeVと1,173MeVのガンマ線を放出するので、800Ciの ^{60}Co からは平均1.25MeVのガンマ線が 5.92×10^{13} photon/secの割合で放出される。

3.5.2 領域の組成

Nevad Test SiteのGroundの組成はTable 2.1の通りである。Ground以外の組成は次の通りである。

Region	Nuclide	Atomic Density (atoms/cm ³)
Air ($\rho=1.02\text{ mg/cm}^3$)	N	3.36×10^{19}
	O	8.93×10^{18}
Container & Plug ($\rho=11.3\text{ g/cm}^3$)	Pb	3.28×10^{22}

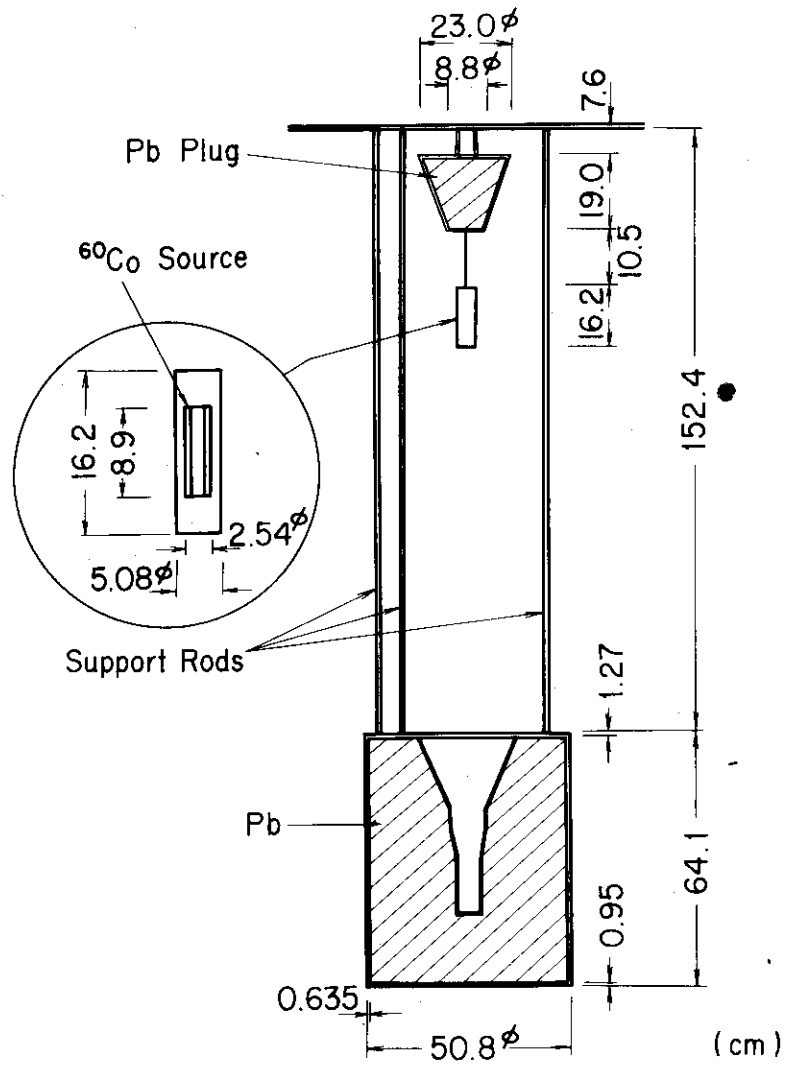


Fig.3.1 Schematic View of ⁶⁰Co Gamma-ray Source.

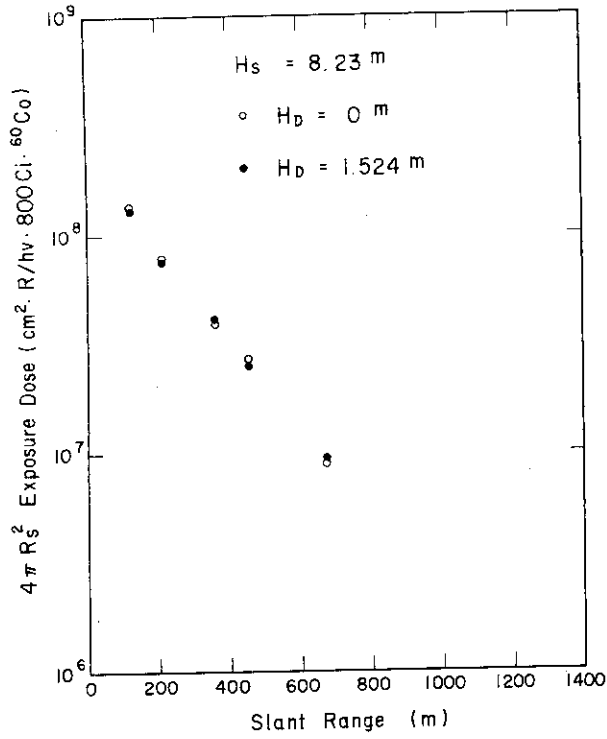


Fig. 3.2 Spatial Gamma-ray Dose Distributions with Detector Heights of 0 m and 1.524 m and Source Height of 8.23 m.

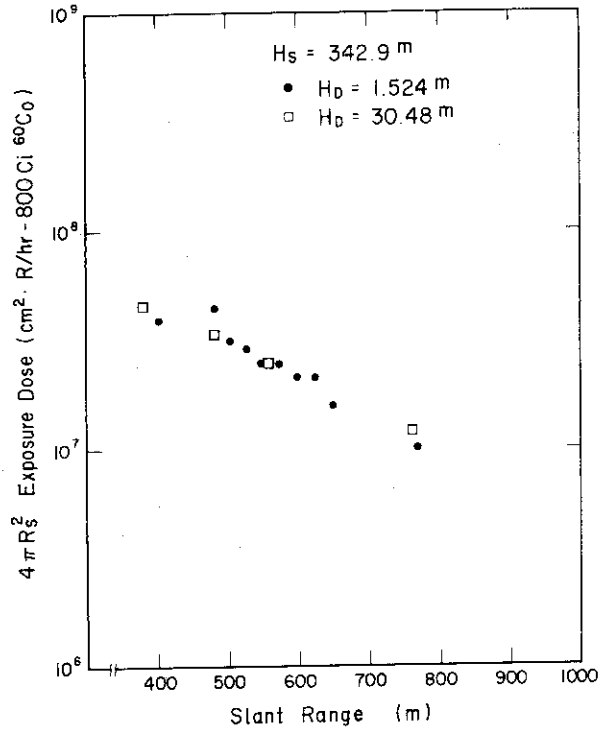


Fig. 3.4 Spatial Gamma-ray Dose Distributions with Detector Height of 1.524 m and 30.48 m and Source Height of 342.9 m.

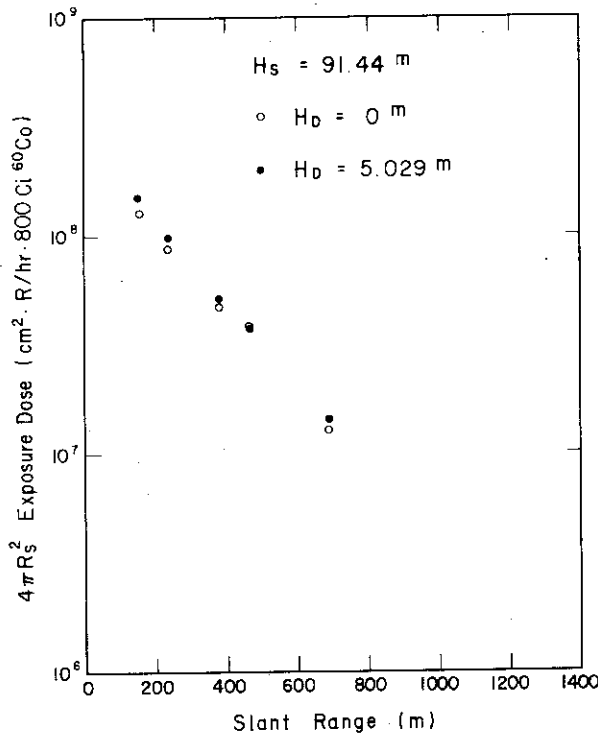


Fig. 3.3 Spatial Gamma-ray Dose Distributions with Detector Height of 0 m and 5.029 m and Source Height of 91.44 m.

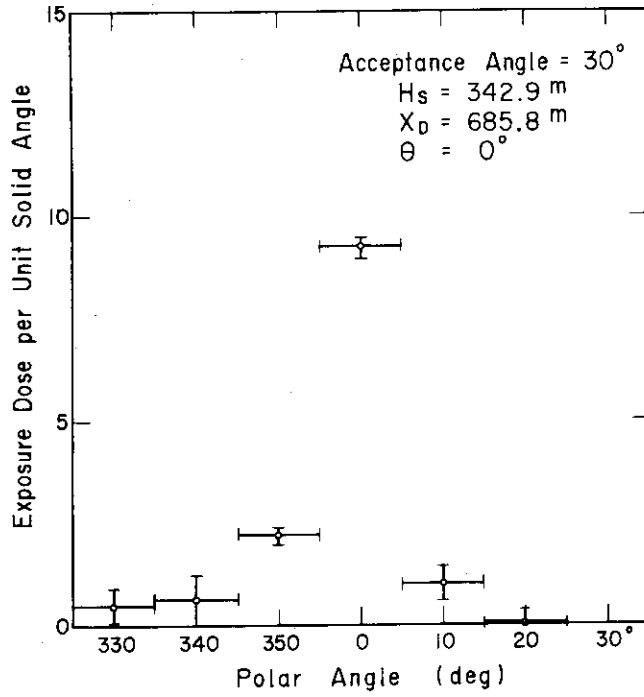


Fig.3.5 Angular Gamma-ray Dose as a Function of Polar Angle.

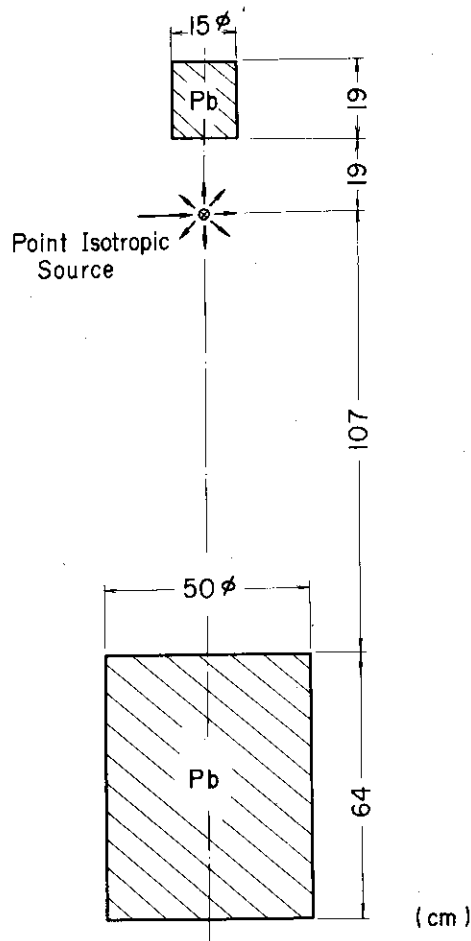


Fig.3.6 Calculation Model of ^{60}Co Gamma-ray Source.

4. スカイシャインベンチマーク問題—その3¹³⁻¹⁷⁾

14 MeV 中性子源

4.1 実験配置

全体の実験配置は、Fig. 2.1 に示した BREN 実験と全く同じで、BREN 原子炉の代わりに、d-T 中性子発生装置 (HENRE Source) を BREN Tower にとりつけ実験が行われた。HENRE 実験では、中性子線量率の空間分布、角度分布、エネルギースペクトル、およびガンマ線量率の空間分布、角度分布、角度エネルギースペクトルが測定された。角度分布の測定は Fig. 2.2 に示した配置で行われた。

4.2 線源

Fig. 4.1 が HENRE d-T 中性子発生装置の全体図で、Fig. 4.2 は Fig. 4.1 の Corona dome, ターゲット近傍の拡大図で、 ErT_2 film (1000cm^2) が 0.635cm 厚の Cu-Backing 上に取り付けられている。HENRE 加速器は 150keV の電圧で D^+ イオンを加速し、 400mA の D^+ イオンで ErT_2 ターゲットを照射することによって約 10^{13} neutron/sec の 14MeV 中性子を発生させる性能をもっている。

HENRE 加速器で発生する中性子の零度方向 (ターゲット真下方向) のエネルギースペクトルを Table 4.1 に示す。Table 4.2 はターゲットからの角度依存スペクトルで、Fig. 4.3 はトリチウムターゲット (直径 3.75cm) 中での中性子発生量の分布である。

Fig. 4.4 は ^7Li FTLD によるターゲットから 1.5m の点 ($\theta=0^\circ$) での測定値から求めた ^7Li FTLD の中性子成分 (\triangle 印) とガンマ線成分 (\bullet 印) である。中性子成分は、同じ点での中性子スペクトルの実測値と古田等¹⁸⁻¹⁹⁾ の実験値を使って求めたもので、ガンマ線成分は FTLD の測定値と中性子成分の差から求めた。Fig. 4.4 に示したガンマ線の成分 (近似的に照射線量に等しい) の平均は 154 レントゲンで、この時の 13MeV から 15MeV の中性子束は 1.54×10^{11} neutron/ cm^2 である。この測定が行われた時の 4π Source 中性子の強度は 3.8×10^{12} neutron/sec で、Fig. 4.4 は 4 時間の積分値なので 1.5m の点でのガンマ線線量は単位 Source 中性子あたり 2.81×10^{-15} R/Source neutron となる。 154R のうち 99R は中性子の空気での散乱による成分と評価されており、残りは X 線 (0.15MeV)、Corona Dome の放射化による γ 線 (2.75MeV)、Cu-Backing での二次 γ 線 (6MeV) が 30.9 、 30.9 および 46.4R の割合になっていると推定されているので、これらのガンマ線によるターゲットから 1.5m での照射線量率は次のようになる。

Gamma-ray Energy (MeV)	Exposure level at 1.5 m (R/source neutron)
0.15	5.64×10^{-16}
2.75	5.64×10^{-16}
6.00	8.46×10^{-16}

4.3 測定方法と測定器

中性子の吸収線量はBRENN実験で使ったと同じ、ORNL Q-1955型 Radsan 検出器で測定。したがって、測定値はFig. 2.5の Conversion Factor を用いて入射中性子束と関係づけられる。また、中性子の吸収線量の角度分布は 15° と 30° の Acceptance Angle を持った Collimator で測定された。

中性子のエネルギースペクトルの測定には ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ スペクトロメータ²⁰⁾が用いられた。この ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ シンチレータは $2''\phi \times 2''t$ の大きさで、 $2''\phi \times 6''t$ の light pipe 上に Mount され、角度依存性がないように工夫されている。

ガンマ線の照射線量の測定は3.3節で述べた Phil 線量計で行われた。3 MeV以上のガンマ線に対しては、測定値が照射線量になるように補正した。また、角度依存の線量は 20° および 30° の Acceptance Angle を持った Collimator を用いて測定された。

ガンマ線のエネルギースペクトルの測定には Pair スペクトロメータ²¹⁾が用いられた。このスペクトロメータの Central Detector は $1''\phi \times 2''t$ の $\text{NaI}(\text{Tl})$ シンチレータで入射ガンマ線はこの Central Detector へのみ入るようコリメートされた。また Pair スペクトロメータの原理上、測定できるガンマ線は約1.5 MeV以上である。

4.4 測定値

Fig. 4.5からFig. 4.7は種々の Source Height (H_s) と Detector Height (H_D) での中性子の吸収線量とガンマ線の照射線量を Slant Range (R_s) の関数として測定したもので、単位 Source Neutron あたりの中性子、ガンマ線の線量率を $4\pi R_s^2$ 倍した値が示されている。

Fig. 4.8からFig. 4.11は Source Heightが152.4 mまたは343 mの時の地上約0.8 mでの中性子のエネルギースペクトルで、単位 Source Neutron あたり、単位 MeVあたりの中性子束に $4\pi R_s^2$ を掛けた値である。

Fig. 4.12は Polar Cengele (ϕ)の関数で測定した中性子の吸収線量の角度分布である。この図で "Winter" と "Summer" は測定が実施された季節で、この時の空気密度は 1.08 mg/cm^3 、 1.00 mg/cm^3 で、また、この測定に使用された Collimator の Acceptance angle は 30° である。Fig. 4.13は Acceptance angle が 15° の Collimator を用いて測定された

中性子線量の角度分布である。

Fig. 4.14は Source Heightが343 mの時、地上約0.8 mでの Polar Angleが0°方向でのガンマ線のエネルギースペクトルで、Acceptance Angleが30°の Collimatorを用いて測定されたものである。

Fig. 4.15は Fig. 4.12の測定と全く同じ条件下で測定した Polar angleに関するガンマ線の照射線量の角度分布である。Fig. 4.16は Acceptance Angleが20°の Collimatorを用いて測定したガンマ線の照射線量の角度分布である。

以上の測定値は、Fig. 4.12と Fig. 4.15を除いて空気密度が 1.04 mg/cm^3 の値に規格化されたものである。また、単位 Source Neutronとはターゲットから放出された中性子 (Table 4.1のスペクトルをもつ)の意味で、13から15 MeVの中性子1個あたりでない。

4.5 計算条件

4.5.1 線源条件

Table 4.1, Table 4.2, Fig. 4.3, Fig. 4.4のデータは、ターゲットから1 mないし1.5 m離れた点で得られた測定値から推定されているので、これらの線源条件はHENRE加速器全体を考慮したものと考えられる。

したがって、線源の形状は直径37.5 cmの円板状とし、その中性子強度分布はFig. 4.3で、放出中性子スペクトルはTable 4.1, Table 4.2の角度スペクトルで与えるか、あるいは全体の体系に対し、線源が小さいのでターゲットを点線源で近似し、Table 4.1のスペクトルをもった中性子が等方的に放出されるというモデルが考えられる。

ガンマ線の線源強度は、4.2節で述べた0.15 MeV, 2.75 MeV, 6.00 MeVのガンマ線がターゲット中心から1.5 mの球殻から球面と外側垂直方向に放出されるとして近似するか、あるいは、ターゲット中心に点等方線源があるものとして近似することが考えられ、この場合のガンマ線の線源強度は次のようになる。

Gamma - ray Energy (MeV)	Exposure level at 0 m (R/Source neutron)
0.15	1.59×10^{-10}
2.75	1.59×10^{-10}
6.00	2.39×10^{-10}

4.5.2 領域の組成

Nevada Test SiteのGroundの組成はTable 2.1の通りである。また、空気の組成は次の通りである。

Nuclide	Atomic Density (atoms/cm ³)
N	3.43×10^{19}
O	9.11×10^{18}

($\rho_{\text{air}} = 1.04 \text{ mg/cm}^3$)

Table 4.1 HENRE Neutron Source Spectrum at Zero Direction

Energy Interval (MeV)	% of Total Fluence	Energy Interval (MeV)	% of Total Fluence
0.1 - 0.5	1.08	7.5 - 8.0	0.44
0.5 - 1.0	1.14	8.0 - 8.5	0.38
1.0 - 1.5	1.60	8.5 - 9.0	0.31
1.5 - 2.0	1.36	9.0 - 9.5	0.28
2.0 - 2.5	1.30	9.5 - 10.0	0.23
2.5 - 3.0	2.67	10.0 - 10.5	0.18
3.0 - 3.5	1.50	10.5 - 11.0	0.15
3.5 - 4.0	1.52	11.0 - 11.5	0.11
4.0 - 4.5	1.40	11.5 - 12.0	0.08
4.5 - 5.0	1.10	12.0 - 12.5	0.05
5.0 - 5.5	0.80	12.5 - 13.0	0.03
5.5 - 6.0	0.76	13.0 - 13.5	0
6.0 - 6.5	0.67	13.5 - 14.0	0
6.5 - 7.0	0.58	14.0 - 14.5	0
7.0 - 7.5	0.51	14.5 - 15.0	79.8

Table 4.2 HENRE Source Angular Spectrum

Cos θ	Polar Angle (θ , deg)	Relative Number of Neutrons Within Designated Energy Interval							
		12.2- 15.0 MeV	10.0- 12.2 MeV	8.18- 10.0 MeV	6.36- 8.18 MeV	4.06- 6.36 MeV	2.35- 4.06 MeV	1.108- 2.35 MeV	0.111- 1.108 MeV
1.00	0	79.8	0.60	1.00	1.80	4.40	6.00	3.90	3.00
0.985	10	79.8	0.60	1.00	1.80	4.40	6.00	3.90	3.00
0.940	20	79.3	0.60	1.00	1.80	4.40	5.74	3.86	2.96
0.866	30	78.4	0.60	1.00	1.80	4.37	5.35	3.80	2.90
0.766	40	77.1	0.60	1.00	1.80	4.34	5.10	3.75	2.87
0.643	50	74.7	0.60	1.00	1.80	4.25	4.73	3.61	2.76
0.500	60	71.2	0.60	1.00	1.80	4.10	4.35	3.38	2.59
0.342	70	65.4	0.60	1.00	1.80	3.92	3.91	3.11	2.38
0.174	80	47.9	0.60	1.00	1.80	3.57	3.13	2.55	1.95
0.087	85	28.4	0.60	1.00	1.80	3.03	2.09	1.70	1.30
0.035	88	15.4	0.60	1.00	1.80	2.35	0.79	0.64	0.49
0	90	32.1	0.60	1.00	1.80	2.37	0.82	0.67	0.51
-0.035	92	38.3	0.60	1.00	1.80	2.37	0.82	0.67	0.51
-0.096	95	68.9	0.60	1.00	1.80	3.12	2.26	1.84	1.41
-0.174	100	73.7	0.60	1.00	1.80	3.42	2.85	2.32	1.78
-0.259	105	61.9	0.60	1.00	1.80	3.66	3.30	2.69	2.06
-0.342	110	71.4	0.60	1.00	1.80	3.97	3.89	3.17	2.43
-0.500	120	75.6	0.60	1.00	1.80	4.13	4.20	3.43	2.62
-0.643	130	74.3	0.60	1.00	1.80	4.25	4.43	3.61	2.76
-0.766	140	72.7	0.60	1.00	1.80	4.32	4.57	3.73	2.85
-0.866	150	67.4	0.59	1.00	1.72	2.61	2.76	2.25	1.72
-0.906	155	30.5	0.27	0.47	0.83	0.85	0.90	0.74	0.56
-0.940	160	17.8	0.16	0.28	0.48	0.29	0.31	0.25	0.19
-0.966	165	11.1	0.10	0.17	0.30	0.15	0.17	0.14	0.10
-0.985	170	8.2	0	0.12	0.22	0	0	0	0
-1.00	180	0	0	0	0	0	0	0	0

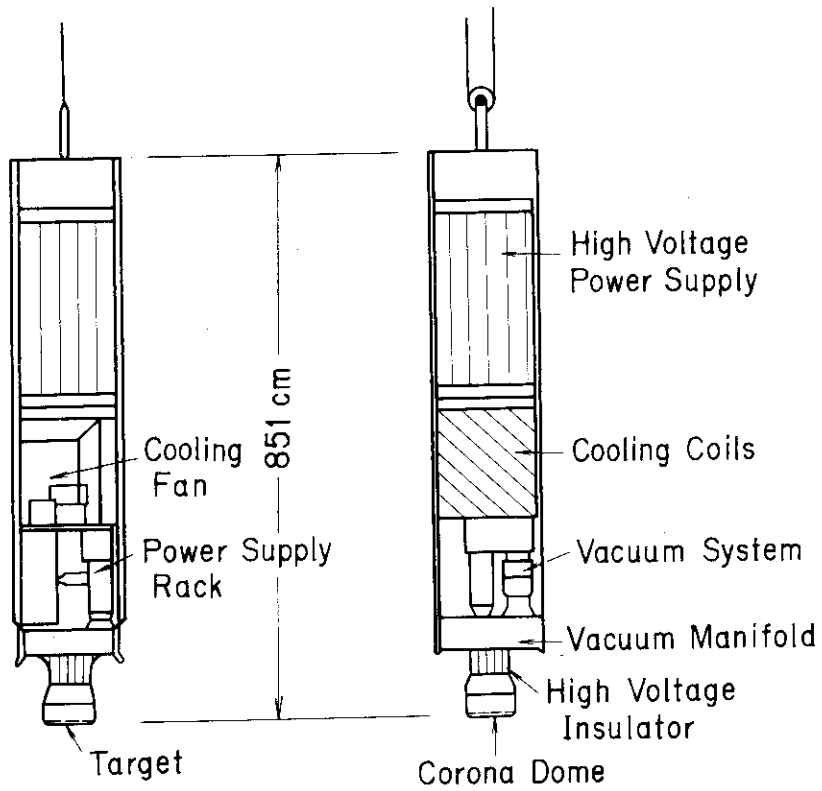


Fig.4.1 Schematic View of HENRE Accelerator.

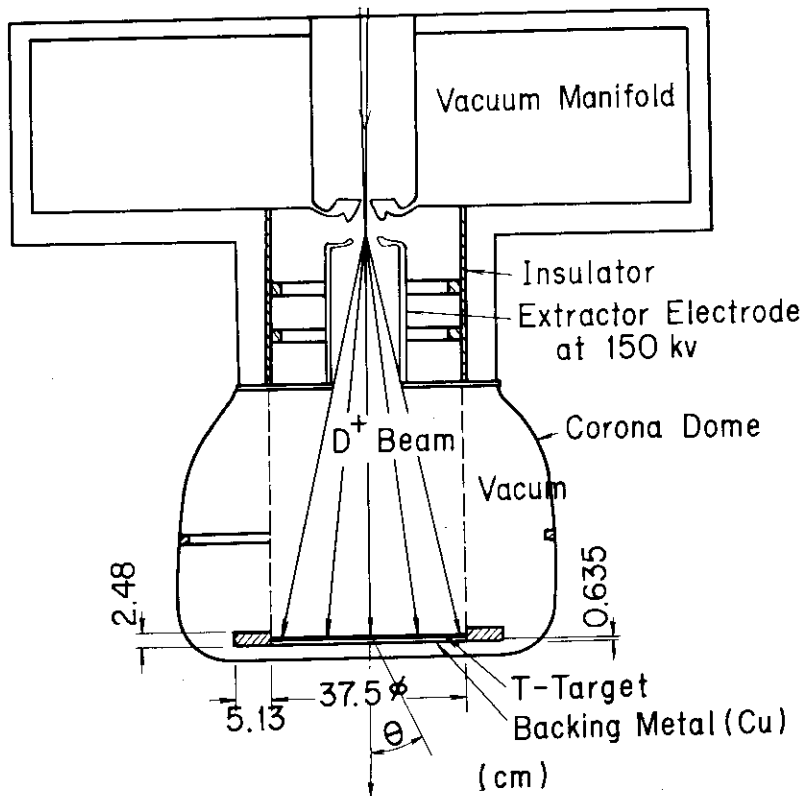


Fig.4.2 Cross Sectional Diagram of HENRE Accelerator.

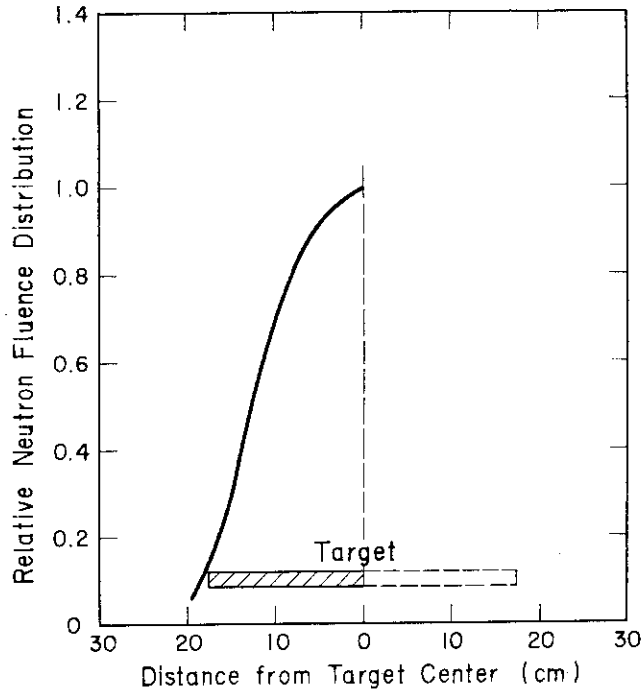


Fig.4.3 Neutron Fluence Distribution across Bottom of Target Plate.

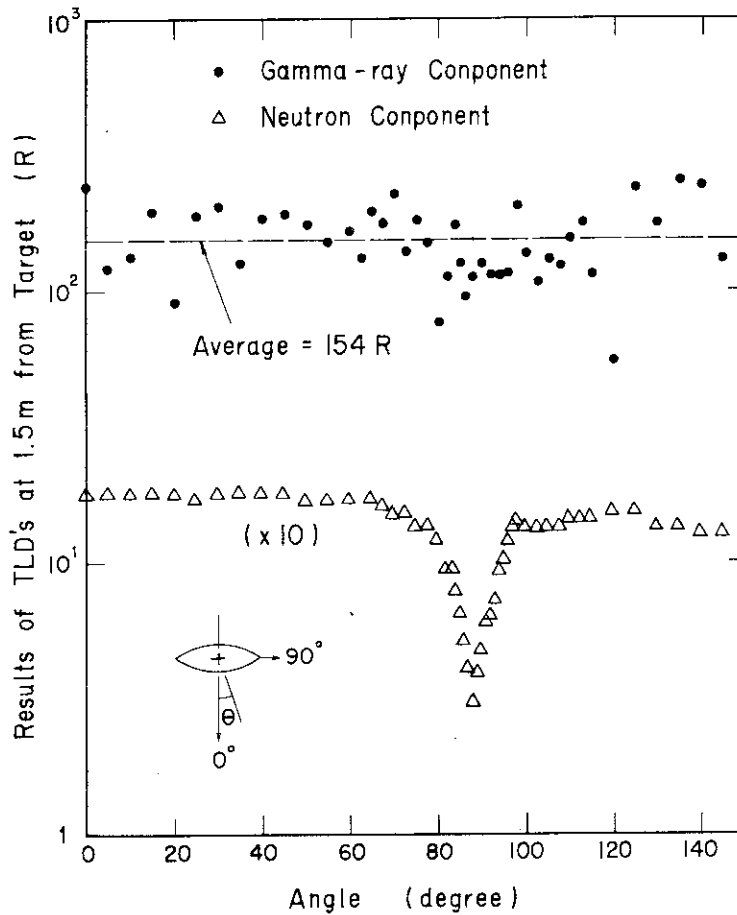


Fig.4.4 HENRE Source Angular Distributions of Gamma Rays and Neutrons Measured by TLD.

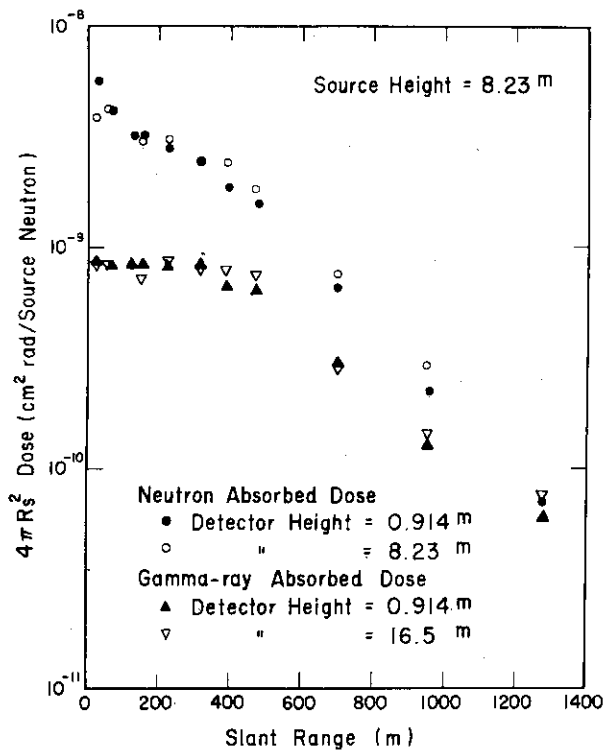


Fig.4.5 Spatial Dose Distributions with Detector Heights of 0.914 m and 8.23 m and Source Height of 8.23 m.

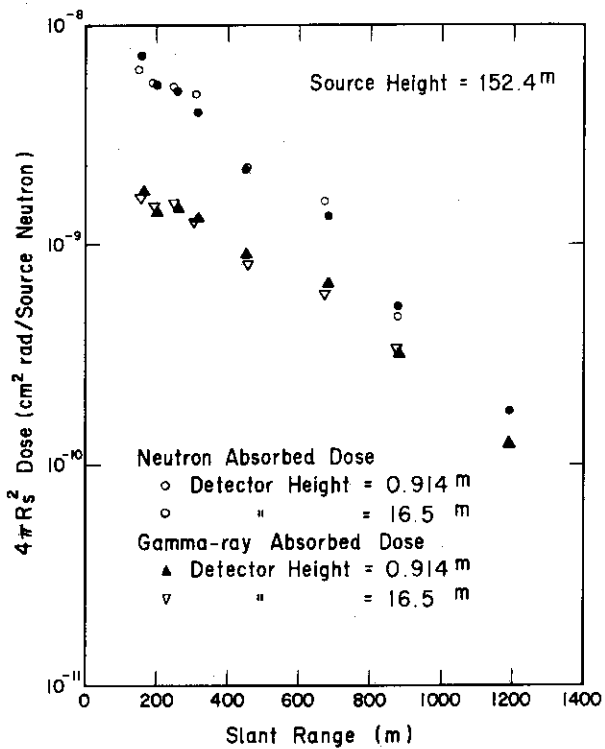


Fig.4.6. Spatial Dose Distributions with Detector Heights of 0.914 m and 16.5 m and Source Height of 152.4 m.

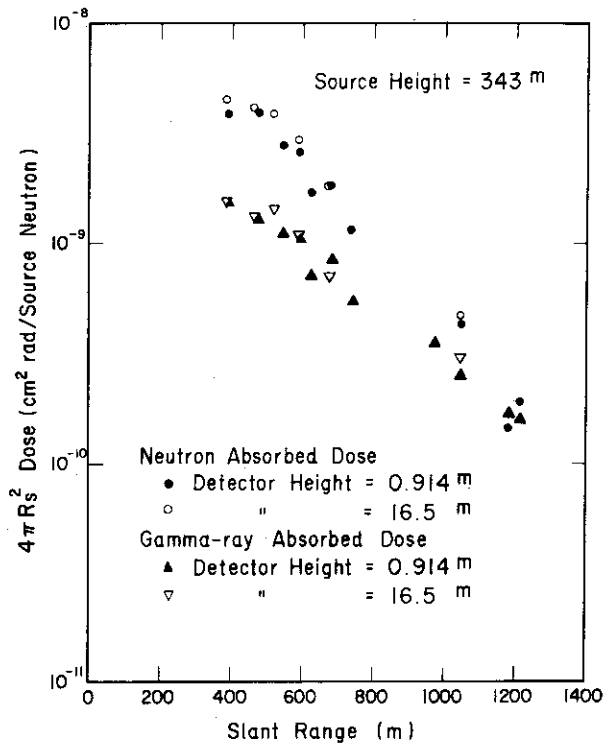


Fig.4.7 Spatial Dose Distributions with Detector Heights of 0.914 m and 16.5 m and Source Height of 343 m.

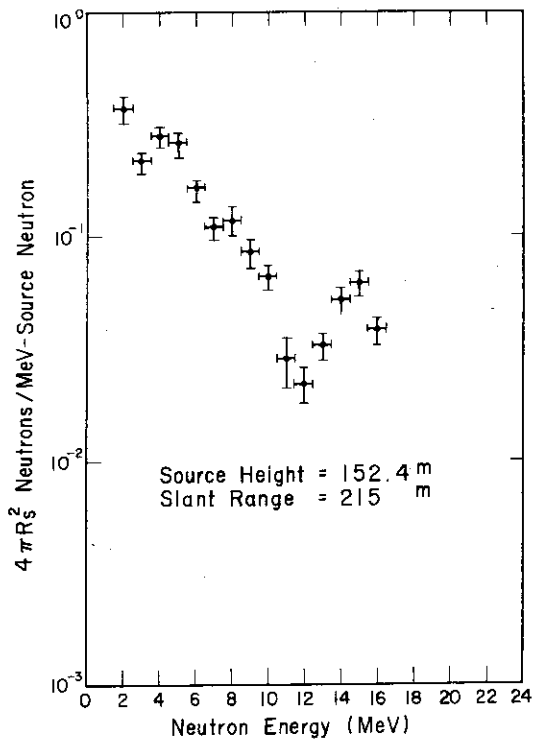


Fig.4.8 Neutron Spectrum at a Slant Range of 215 m with Source Height of 152.4 m.

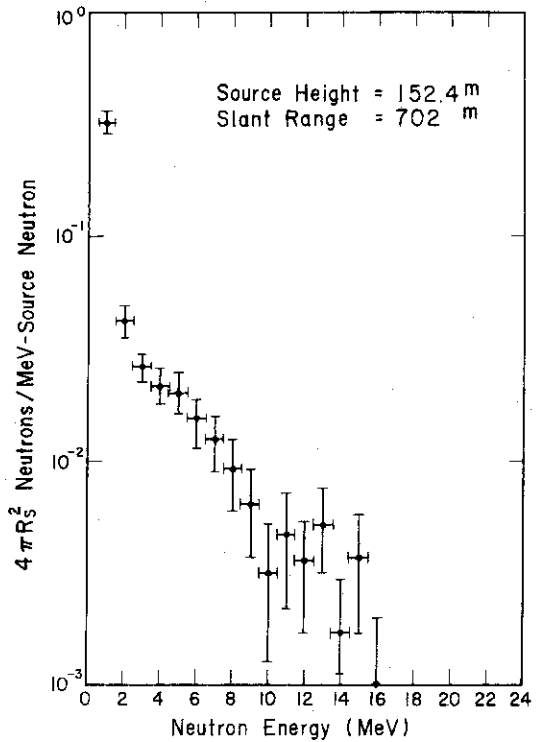


Fig.4.9 Neutron Spectrum at a Slant Range of 702 m with Source Height of 152.4 m.

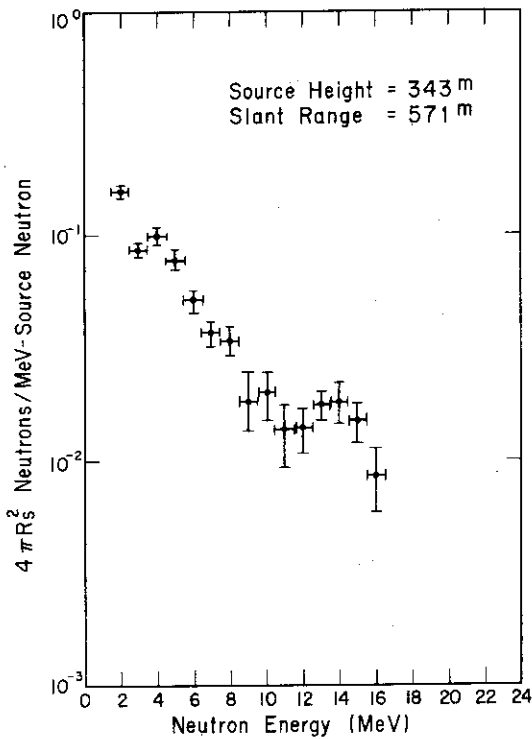


Fig.4.10 Neutron Spectrum at a Slant Range of 571 m with Source Height of 343 m.

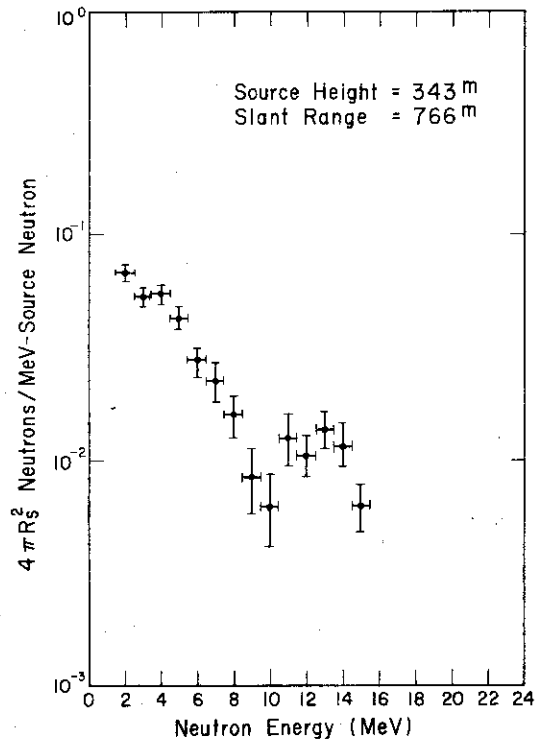


Fig.4.11 Neutron Spectrum at a Slant Range of 766 m with Source Height of 343 m.

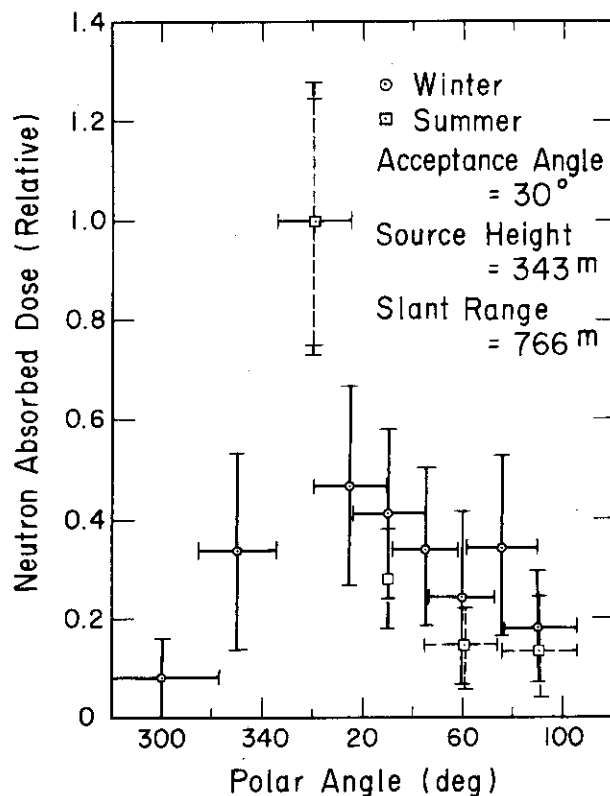


Fig.4.12 Angular Neutron Dose as a Function of Polar Angle for a 30° Acceptance Angle.

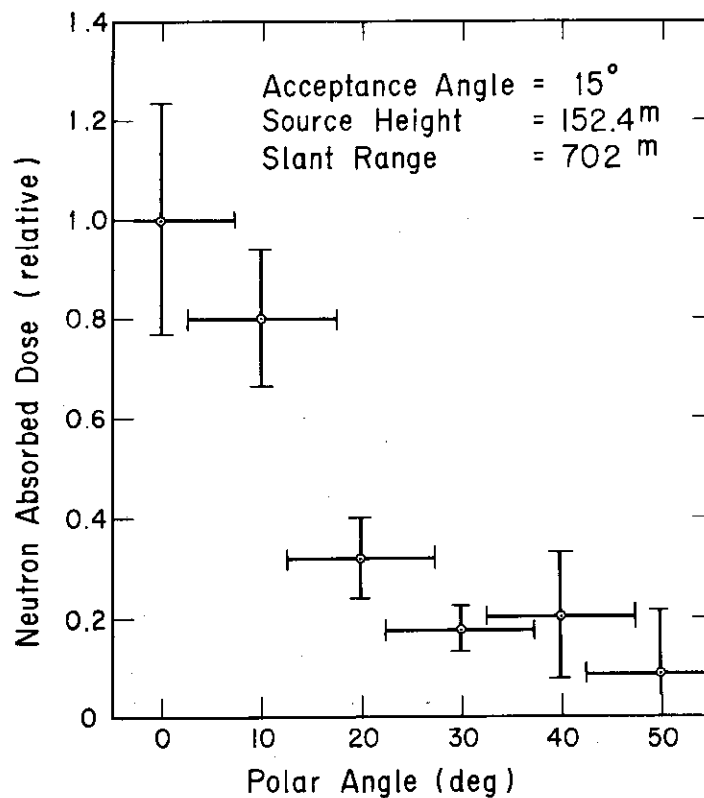


Fig.4.13 Angular Neutron Dose as a Function of Polar Angle for a 15° Acceptance Angle.

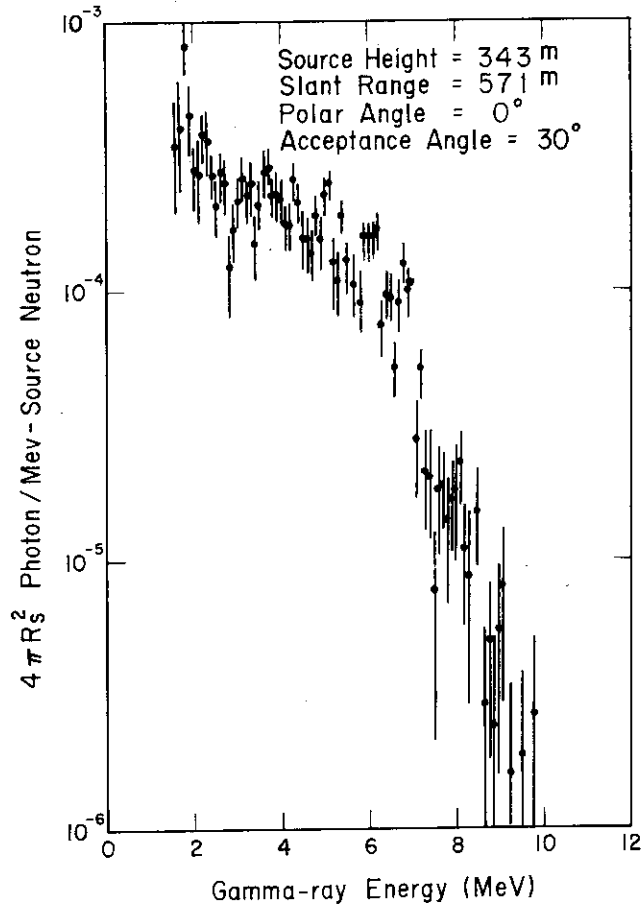


Fig.4.14 Gamma-ray Spectrum for a 0° Polar Angle.

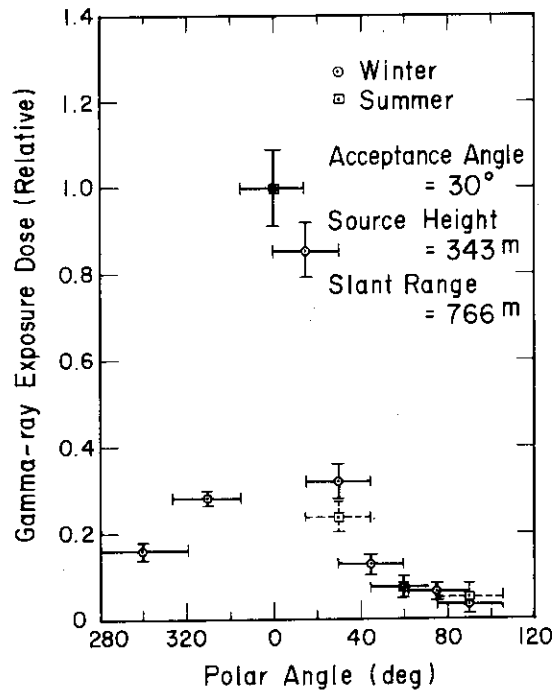


Fig.4.15 Angular Gamma-ray Dose as a Function of Polar Angle for a 30° Acceptance Angle.

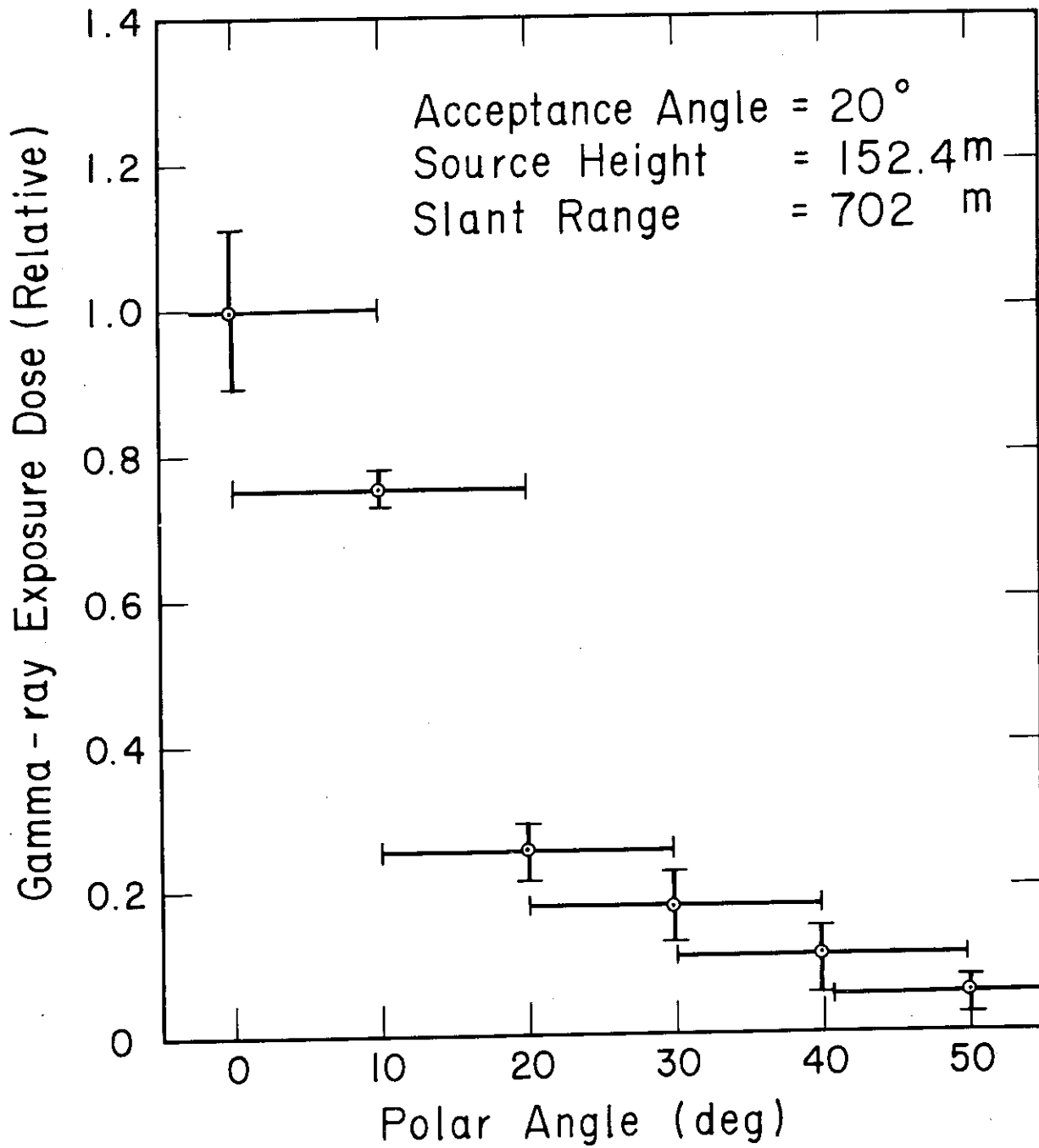


Fig.4.16 Angular Gamma-ray Dose as a Function of Polar Angle for a 20° Acceptance Angle.

5. ま と め

本報告書では、3種類の線源すなわち核分裂中性子源、 ^{60}Co ガンマ線源、それに14MeV中性子源を線源としたAir over Ground形状でのガンマ線と中性子のスカイシャイン実験をもとに作成された3種類のベンチマーク問題が提案された。これらのベンチマーク問題には、線源の種類、測定範囲の広さ、測定値の多様性などの点で、スカイシャイン計算コードの計算手法や計算精度を検証する上でほゞ十分なデータが含まれていると考えられる。

ところで、ガンマ線や中性子のスカイシャインは線源から1000m程度まで評価しなければならない。本報告書で取上げたスカイシャイン実験も含めて、これまで成されてきたほとんどのスカイシャイン実験は、線源が空気中あるいは地上に裸で設置されている体系でなされているため、線源から比較的近距离での測定値は直接線の寄与が大きく、スカイシャインで重要な散乱線の挙動が効果的に把握できないきらいがある。したがって、今後に残されたスカイシャイン実験の課題は、直接線を十分遮蔽した配置で、線源から100mないし200m以内でのガンマ線や中性子の線量率やエネルギースペクトルを測定することで、特に線源の形状や強度、エネルギースペクトルそれに全体の実験配置など、計算コードとの比較が十分精度よく行なえるように配慮することが重要である。

また、一般にスカイシャインの計算は線源が収容されている容器あるいは建物も含めて考慮されなければならない。しかし、多くの場合、電子計算機の容量などの制約から、実際のスカイシャインの計算は線源容器や建物の外表面から漏洩する放射線を線源として行われる。したがって実際の線源から容器や建物等の表面までの計算精度も重要であり、スカイシャインのジャンルとは異なるが、こういった体系での計算法を確立することと、そのための実験を行うことも今後に残された重要課題である。

本報告書で取上げたベンチマーク問題—その1とその3の中性子線量率の測定値は約100keV以上の線量率である。これまでの種々の計算から100keV以下の中性子の全線量率への寄与は線源から1000m程度で10ないし15%程度と推定されているが、二次ガンマ線の寄与まで定量的に把握するためには100keV以下の中性子の測定も重要であると考えられる。

謝 辞

この報告書をまとめるについて、運輸省船舶技術研究所 竹内清博士、ならびに日本原子力研究所物理部古田悠博士から多くの御助言、御指導をいただいたことについて、こゝに深い感謝の意を表します。

5. ま と め

本報告書では、3種類の線源すなわち核分裂中性子源、 ^{60}Co ガンマ線源、それに14MeV中性子源を線源としたAir over Ground形状でのガンマ線と中性子のスカイシャイン実験をもとに作成された3種類のベンチマーク問題が提案された。これらのベンチマーク問題には、線源の種類、測定範囲の広さ、測定値の多様性などの点で、スカイシャイン計算コードの計算手法や計算精度を検証する上で十分なデータが含まれていると考えられる。

ところで、ガンマ線や中性子のスカイシャインは線源から1000m程度まで評価しなければならない。本報告書で取上げたスカイシャイン実験も含めて、これまで成されてきたほとんどのスカイシャイン実験は、線源が空気中あるいは地上に裸で設置されている体系でなされているため、線源から比較的近距离での測定値は直接線の寄与が大きく、スカイシャインで重要な散乱線の挙動が効果的に把握できないきらいがある。したがって、今後に残されたスカイシャイン実験の課題は、直接線を十分遮蔽した配置で、線源から100mないし200m以内でのガンマ線や中性子の線量率やエネルギースペクトルを測定することで、特に線源の形状や強度、エネルギースペクトルそれに全体の実験配置など、計算コードとの比較が十分精度よく行なえるように配慮することが重要である。

また、一般にスカイシャインの計算は線源が収容されている容器あるいは建物も含めて考慮されなければならない。しかし、多くの場合、電子計算機の容量などの制約から、実際のスカイシャインの計算は線源容器や建物の外表面から漏洩する放射線を線源として行われる。したがって実際の線源から容器や建物等の表面までの計算精度も重要であり、スカイシャインのジャンルとは異なるが、こういった体系での計算法を確立することと、そのための実験を行うことも今後に残された重要課題である。

本報告書で取上げたベンチマーク問題—その1とその3の中性子線量率の測定値は約100keV以上の線量率である。これまでの種々の計算から100keV以下の中性子の全線量率への寄与は線源から1000m程度で10ないし15%程度と推定されているが、二次ガンマ線の寄与まで定量的に把握するためには100keV以下の中性子の測定も重要であると考えられる。

謝 辞

この報告書をまとめるについて、運輸省船舶技術研究所 竹内清博士、ならびに日本原子力研究所物理部古田悠博士から多くの御助言、御指導をいただいたことについて、ここに深い感謝の意を表します。

5. ま と め

本報告書では、3種類の線源すなわち核分裂中性子源、 ^{60}Co ガンマ線源、それに14MeV中性子源を線源としたAir over Ground形状でのガンマ線と中性子のスカイシャイン実験をもとに作成された3種類のベンチマーク問題が提案された。これらのベンチマーク問題には、線源の種類、測定範囲の広さ、測定値の多様性などの点で、スカイシャイン計算コードの計算手法や計算精度を検証する上でほゞ十分なデータが含まれていると考えられる。

ところで、ガンマ線や中性子のスカイシャインは線源から1000m程度まで評価しなければならない。本報告書で取上げたスカイシャイン実験も含めて、これまで成されてきたほとんどのスカイシャイン実験は、線源が空気中あるいは地上に裸で設置されている体系でなされているため、線源から比較的近距离での測定値は直接線の寄与が大きく、スカイシャインで重要な散乱線の挙動が効果的に把握できないきらいがある。したがって、今後に残されたスカイシャイン実験の課題は、直接線を十分遮蔽した配置で、線源から100mないし200m以内でのガンマ線や中性子の線量率やエネルギースペクトルを測定することで、特に線源の形状や強度、エネルギースペクトルそれに全体の実験配置など、計算コードとの比較が十分精度よく行なえるように配慮することが重要である。

また、一般にスカイシャインの計算は線源が収容されている容器あるいは建物も含めて考慮されなければならない。しかし、多くの場合、電子計算機の容量などの制約から、実際のスカイシャインの計算は線源容器や建物の外表面から漏洩する放射線を線源として行われる。したがって実際の線源から容器や建物等の表面までの計算精度も重要であり、スカイシャインのジャンルとは異なるが、こういった体系での計算法を確立することと、そのための実験を行うことも今後に残された重要課題である。

本報告書で取上げたベンチマーク問題—その1とその3の中性子線量率の測定値は約100keV以上の線量率である。これまでの種々の計算から100keV以下の中性子の全線量率への寄与は線源から1000m程度で10ないし15%程度と推定されているが、二次ガンマ線の寄与まで定量的に把握するためには100keV以下の中性子の測定も重要であると考えられる。

謝 辞

この報告書をまとめるについて、運輸省船舶技術研究所 竹内清博士、ならびに日本原子力研究所物理部古田悠博士から多くの御助言、御指導をいただいたことについて、こゝに深い感謝の意を表します。

References (参考文献)

- 1) Mackenthaler F.J., Holland L.B., and Maerker R.E. : " In-Air Measurements in the Vicinity of the TSR-II", ORNL-3288 (1963).
- 2) Profio A.E. et al. : "Shielding Benchmark Problems," ORNL-RSIC 25 (1970).
- 3) Sanders F.W. et al. : "Operation Plan and Hazards Report-Operation BREN," CEX-62.02 (1962).
- 4) Auxier J.A. et al. : "General Correlative Studies-Operation BREN", CEX-62.03 (1963).
- 5) Thorngate J.H. et al. : "Energy and Angular Distribution of Neutrons and Gamma Rays-Operation BREN," CEX-62.12 (1967).
- 6) Haywood F.F. et al. : "An Experimental Investigation of the Spatial Distribution of Dose in an Air-over-Ground Geometry," CEX-62.14 (1964).
- 7) Hurst G.S. : Brit. J. of Radiol., 27, 353 (1954).
- 8) Wagner E.B. and Hurst G.S. : Rev. Sci. Instrum., 29, 153 (1958).
- 9) Wagner E.B. and Hurst G.S. : Health Phys., 2, 57 (1959).
- 10) Henderson B.J. : "Conversion of Neutron or Gamma-ray Flux to Absorbed Dose Rate," XDC 59-8-179 (1959).
- 11) Allen F.J. et al. : "Neutron Reflection and Flux versus Depth for Nevada Test Site Soil", BRL-1190 (1963).
- 12) Wagner E.B. and Hurst G.S. : Health Phys., 5, 20 (1961).
- 13) Haywood F.F. et al. : "Operation Plans for Operation HENRE," CEX-65.03 (1965).
- 14) Provenzano T.G. et al. : "Feasibility Study ; Intense 14 MeV Neutron Source for Operation HENRE," CEX-65.01 (1966).
- 15) Burson Z.G. : "Radiation Output Description from the $T(d,n)^4\text{He}$ Reaction in a Large Target (1000 cm^2) - Operation HENRE," CEX-65.04 (1971).
- 16) Fritzche A.E. et al. : "Measured Low-Altitude Neutron and Gamma Dose Distributions due to a 14 MeV Neutron Source," EGG -1183-1449 (1969).
- 17) Thorngate J.H. et al. : "Energy and Angular Distribution of Neutrons and Gamma Rays - Operation HENRE," CEX-65.11 (1969).
- 18) Furuta Y. and Tanaka S. : Nucl. Instr. Meth., 104, 365 (1972).

- 19) Tanaka S. and Furuta Y. : Nucl. Instr. Meth., 140, 395 (1977).
- 20) Murray R.B. : "Use of $^6\text{LiI}(\text{Eu})$ as a Scintillation Detector and Spectrometer for Fast Neutrons," Nucl. Instr., 2, 237 (1958).
- 21) Thorngate J.H. : "Radiation Spectrometry"; ORNL-3849 (1965).