

解 説(Ⅱ)

月面基地の遮蔽計算の現状

Issues in Space Radiation Shielding for Lunar Base

清水建設(株)宇宙開発室

大石 晃嗣

oishi@spo.shimz.co.jp

1. はじめに

今から6年前の1989年7月20日、米国ブッシュ大統領はアポロ11号の月面着陸の20周年記念演説で、月面に基地を建設し火星への有人探査を目的とした Space Exploration Initiative (SEI)¹⁾ という名称の新しい宇宙政策を打ち出し、これを機に「再び月へ」という気運が高まった。このプログラムを遂行するためには、まず長期滞在のための月面基地が不可欠で NASA を中心に基地建設の検討が進められた。

幸いなことに、我々の住む地球には大気やヴァンアレン帯と呼ばれる放射線帯が存在するため、宇宙空間の高エネルギー放射線は十分遮蔽され、地上では特別の遮蔽を検討する必要は無い。ところが、月には大気や放射線帯のような自然の遮蔽機構が全くない為、長期にわたる滞在には放射線遮蔽の検討が重要な課題の一つとなってくる。

そこで、本稿では月面基地の遮蔽研究の現状を概観するとともに、その問題点についての考察を行った。なお、一般的な宇宙関連の核データのニーズに関しては既に菊池、深堀両氏がまとめられているので²⁾、そちらの文献を参照願いたい。

2. 月面の放射線環境

一般に宇宙空間には、Fig. 1 に示すような放射線環境がある。このうち、月面基地の遮蔽設計にとって特に問題となる放射線は、銀河宇宙線と太陽放射線の2種類の放射線である。

銀河宇宙線は、銀河系の中心部を囲む半径1万5千光年のドーナツ状の領域で発生している宇宙線で、陽子約87%、ヘリウムイオン12%、重イオン1%の荷電粒子で構成されている。宇宙線は、超新星(スーパーノバ)によって発せられる磁気ショック波などによって加速され、数10～数100 GeVの高エネルギーをもち、Fig. 2に示されるようなスペクトルをもつ。その構成粒子は、イオン化されたH、He、C、N、O、

Si、Ca、Feなどの原子核である。また、そのエネルギーは非常に高く物質中での飛程が長い。宇宙線による被ばくを考える際、第一次高エネルギー粒子自体からの被ばくよりもカスケード現象によって生成される種々の2次粒子（シャワー効果）による被ばくの方が大きいことに注意する必要がある。

太陽放射線は、太陽の活動にともない太陽から放出される主として陽子で構成される放射線である。また太陽フレア現象は、太陽黒点の上空のコロナで起こる磁気を帯びたプラズマの大規模な爆発現象で、黒点活動が活発な時に多発する。発生要因は、太陽表面での磁気エネルギーの解放であり、磁場に閉じ込められていたプラズマが加速され、放出されるものであるとされている。しかしながら、エネルギーの解放機構については磁力線の再結合、異常ジュール熱、電気二重層、断熱圧縮などが提案されているものの、未だ解決されていない。また、フレアの特徴としては、1～2日の短時間に膨大なエネルギーを放出することがあげられる。太陽フレアの発生頻度は、放出粒子エネルギーの上限 1 GeV に達するような極大なものが、1太陽活動周期（11年）中に20回程度発生している。これをもとに太陽フレアの発生を予測しようという研究も進められているが、数時間後のものが辛うじて予測できる程度であり、まだ確立されているとはいえない。発生する粒子の種類はエネルギーの高い陽子が大部分であるが、重い核もある。また、電磁波、可視光、X線、ガンマ線も放出される。太陽フレア陽子線のエネルギースペクトルを Fig. 3 に示す。1972年8月4日～7日にかけての太陽フレアでは、月面上（昼の部分）での線量当量が10 Svにも達する放射線量を観測した。

3. 月面基地の遮蔽計算

前節で述べたように、地球上と月面とでは放射線環境は大きく異なっている。そこで、月面での長期滞在を考える上では、何らかの放射線対策が必要となってくる。いま仮に、月面の放射線量を地球上と同じレベルに保つための遮蔽をコンクリート（ $\rho=2.3$ ）又はレゴリス（ $\rho=1.3$ ）を用いて施すことを考える。大気の密度は地表面と高地とではそれぞれ 1000 g/cm^2 および 700 g/cm^2 となる。そこで、大雑把に大気のみが遮蔽に関与すると仮定すると、コンクリートを用いた場合は、地表面では4.4 m、高地では3 m、また、レゴリスを用いた場合は、高地でも5.4 m、さらに地表面では7.7 mの遮蔽厚が必要となる。しかしながら、これだけの遮蔽を施すことはコスト面からも現実的ではなく、月面基地の遮蔽設計には精度の高い遮蔽計算法が必要不可欠となってくる。

宇宙放射線のような高エネルギー荷電粒子線は遮蔽物と相互作用を起こした時点でその原子核を破壊し、陽子、中性子、パイ中間子、ミュー中間子、光子、電子等の二次粒

子を放出しながらそのエネルギーを失っていく。さらに、それら放出粒子は反応に十分なエネルギーを持つかぎり、他の原子核と次々に反応を繰り返し放出2次粒子数を増やしていくため、その挙動は極めて複雑なものとなる（ハドロンカスケード）。これら高エネルギー放射線の遮蔽計算は、加速器工学の分野で発展してきた。その方法は、入射粒子が遮蔽物に入射し原子核との反応を核反応モデルを用い計算し、2次放出粒子の種類、エネルギー、放出角度等を一つ一つシミュレートしていくものである。この計算方法は、現実に行っている核反応を完全に計算コードに組み込んでいく困難さや、計算に使用する基礎物理量（核データ）が実験的にほとんど求められていないため理論計算に頼らざるを得ないという欠点を持つが、現在最も信頼性のある方法であると考えられている。この種の代表的なコードに HETC³⁾ がある。HETC コードは、入射粒子として陽子、中性子、パイ中間子等の他、質量数 20 までの重イオンの取扱いも可能である。また基本的には、入射粒子は単一エネルギーであるが、ソースのサブルーチンの改良により宇宙線のような連続エネルギースペクトルをもつ放射線の遮蔽計算も可能となる。しかしながら、一つ一つの粒子のふるまいを一々計算するため、解析に必要な十分な統計量を得るには、膨大な計算時間を要するという欠点をもつ。

そこで、NASA Langley 研究所では、以下に示すような一次元の Boltzmann の輸送方程式を決定論的に解く方法（BRYNTRN⁴⁾）の開発を進めている。

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial E} S_j(E) + \sigma_j(E) \right] \phi_j(x, E) = \sum_{k>j} \int_E^\infty \sigma_{j,k}(E, E') \phi_k(x, E') dE'$$

ϕ_j : quantity to be evaluated, type j with having energy E at spatial location x,

S_j : stopping power in various media,

σ_j : macroscopic total nuclear cross section,

σ_{jk} : differential nuclear interaction cross section, the production of type j particles with energy E by type k particles of energies E' ($>E$).

このコードは現在のところ残念ながら米国国外には未公開であり、日本国内では入手が不可能である。しかしながら、解法の詳細およびそれぞれの使用断面積に関しては、ドキュメントが出版されているので興味のある方は文献を参照していただきたい。⁴⁾

John E. Nealy らは、上記の計算コードを用いた月面基地の遮蔽の予備的な計算の結果を報告している。⁵⁾ 線源条件としては、Fig. 4 に示すような solar minimum 時の銀河宇宙線を用い、陽子、 α 粒子、および重粒子（ $3 < Z < 9$ と $10 < Z < 28$ の2グループで代表）の4種類を入力とし、 SiO_2 、 MgO 、 Al_2O_3 、 FeO で構成されるレゴリス遮蔽体の透過スペクトルの計算を行っている（O、Al、Mg、Si、Fe の各成分

比はそれぞれ、61.5、7.5、5.5、19.3、および 6.1 %)。Fig. 5 にレゴリス 50 cm の深さでのスペクトルの計算結果を示す。図から明らかなように、入射粒子とレゴリスの構成物質の原子核との相互作用によって生成された 2 次中性子の量がとくに $E_n < 100$ MeV の低エネルギー領域で増大している。さらに、Fig. 6 に各放射線の積分量のレゴリスの厚さに対する減衰の様子を示す。 α 粒子以上の重イオンの減衰は指数関数的に急激に減衰するのに対して、陽子の減衰は緩やかである。また、2 次的に生成した中性子は 20 cm 付近までは急激に増加するが、それ以深では 100 cm まではほぼ一定値を保っている。25 cm 以深では、中性子の量は入射粒子の大半を占める陽子の量を上回っている。また、計算で得られた各粒子のスペクトルを基に算出された BFO (Blood Forming Organ) 線量当量とレゴリスの深さとの関係を Fig. 7 示す。レゴリスの深さ 10 cm 付近までは全線量当量に対する重イオンの占める割合は大きいですが、深くなるに従いその割合は急激に減少し 40 cm 以深では、陽子と 2 次中性子の全線量当量に対する割合は 90 % 以上に達する。ここで、NASA の暫定的な宇宙飛行士の年間許容被ばく線量の 50 rem/y を規準とすると、計算結果からは重イオンの計算精度が重要となってくる。しかしながら、月面基地の壁厚が構造や熱遮蔽の問題からある程度の厚みを持たざるを得ない事及び、昨今の ALARA の考えから宇宙飛行士の年間許容被ばく線量も放射線従事者並の 5 rem/y を目指す事を考慮すると、陽子及び 2 次中性子の月面基地の遮蔽設計に対する計算精度は益々重要となってくる。

4. NASA の計算結果と HETC-MCNP モンテカルロ計算コードの計算結果との比較

この節では、月面基地の遮蔽上、特に重要となる陽子及び 2 次中性子の BRYNTRN による計算精度の検討をモンテカルロ計算コード HETC 及び MCNP⁶⁾ の計算結果との比較で検討した。BRYNTRN の検証は単一入射エネルギーについてはモンテカルロ計算コードを用いていくつも行われているが、^{7, 8)} 宇宙線のような連続エネルギーについての検証は極くわずかである。

4.1 線源条件及び遮蔽材

入射粒子は Fig. 8 に示す Solar minimum 時の陽子で、そのエネルギー範囲は $1 \times 10^1 \sim 6 \times 10^5$ MeV である。遮蔽材は密度 1.3 g/cm^3 及び 2.3 g/cm^3 のレゴリス及びコンクリートで、その原子数密度を Table 1 示す。

4.2 HETC-MCNP の計算条件

計算の幾何形状は、厚さ t 、 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ の直方体で、厚さ t は今回の計算では、10、50、100、200 g/cm^2 とした。HETC から MCNP へのつなぎのエネルギーは 15 MeV で、使用した断面積は ENDF/B-IV ベースである。MCNP の入力中性子スペクトルは、HETC の計算結果を用いた。ヒストリー数は、深さによって 10,000 から 100,000 で、ある程度の統計精度が得られる値を用いた。ちなみに計算時間は、CRAY XMP を用いた HETC-MCNP で約 1 時間に対して、BRYNTRN の場合 VAX8800 で 2 ～ 3 分である。

4.3 計算結果

(1) スペクトル

Fig. 9 及び 10 に陽子と中性子のコンクリート中のスペクトルの計算結果を示す。

陽子は、 $E_p < 100\text{ MeV}$ では十分な統計量は得られていないが、 $E_p > 100\text{ MeV}$ では統計エラーは 20 % 以下である。HETC による計算では陽子のスペクトルの形は入射スペクトルとほぼ同じであるのに対して、BRYNTRN では $E_p < 200\text{ MeV}$ では表面に近い 10 g/cm^2 の深さでも変化しており、ピーク位置も 500 MeV から 100 MeV へ移動している。

中性子の場合は、0.1 MeV まで結果が得られており、統計エラーも $E_n < 10\text{ GeV}$ の範囲では 10 % 以下である。また、低エネルギーの中性子束が遮蔽体の深層部に行くにしたがって、増大している。レゴリスの計算結果もコンクリートの場合とほぼ同様である。

(2) BRYNTRN と HETC-MCNP との計算結果の比較

各エネルギー領域の BRYNTRN と HETC-MCNP との計算結果の比較を、B/H 比として Fig. 11 に示す。

陽子の場合は、低エネルギー ($E_p < 200\text{ MeV}$) 領域を除けば、両者は HETC-MCNP の誤差の範囲内で $-20 \sim +20\%$ のよい一致をしている。また、低エネルギー領域に関しては、HETC-MCNP の誤差の問題や、エネルギー境界のとり方にまだ問題が残されているので、ここでは明確に両者の不一致についての言及はできない。

また、中性子の場合は表面から浅い位置では、両者の一致はよいものの、深層部に行くにしたがって各エネルギー領域で、BRYNTRN の計算結果は HETC-MCNP の結果を過小評価している。この過小評価は月面基地のような厚い遮蔽の設計では、中性子の全線量当量に対する中性子の寄与が大きいことから問題点が残る。

5. 考察

計算結果の比較から、BRYNTRNによる低エネルギー中性子の計算結果とHETC-MCNPの計算結果との間に、特に深層部で大きな不一致が認められた。そこで、この原因の一部を明らかにするために、コンクリート中の中性子スペクトルの実験結果と計算結果との比較を行った。実験は、中性子源が14 MeV単色で遮蔽体はコンクリートである。⁹⁾ 計算はMCNPで行い、使用断面積はHETC-MCNPと同じENDF/B-IVベースのライブラリーを用いた。実験と計算結果をFig. 12に示す。図から明らかなように、MCNPによる計算結果は実験と±20%でよい一致を示している。したがって、低エネルギー中性子の輸送に関してはHETC-MCNPの計算結果は妥当であることがわかる。En < 10 MeVのBRYNTRNの計算結果の大きな過小評価のひとつの原因として、輸送計算に問題があるといえる。しかしながら、ここでの検討だけでは、低エネルギー中性子の生成に関しては言及出来かねるので、両者の計算結果の不一致の原因をより明確にするためには、高エネルギー陽子の積分実験による検証が必要となってくる。

6. 結論

月面基地の遮蔽計算の現状についてNASAの例を紹介するとともに、その計算精度に関する検討を、現在最も信頼性の高いモンテカルロ計算コードHETC-MCNPを用いた計算結果との比較により行った。その結果、月面基地の遮蔽を検討する場合に特に問題となる2次中性子束の両者の計算結果の間に大きな不一致が、特に深層部でみられた。

NASAの計算コードは確かに計算速度が著しく速く、初期の段階での遮蔽設計の検討には極めて有用であるが、特に低エネルギーの中性子の計算結果については、その取り扱いには注意を要することが明らかとなった。

参考文献

1. "America at the Threshold," U.S. Government Printing Office, Washington D.C. (1991)
2. Y.KIKUCHI and T.FUKAHORI, "Result of Inquiry on Intermediate Energy Nuclear Data Needs for Various Applications as Start-up Task of SG13," NEANSC/WPIEC/SG13 meeting at NEA Data Bank, December 9 (1994)
3. K.C.CHANDLERH and T.W.ARMSTRONG, "Operating Instructions for the High-Energy Nucleon-Meson Transport code HETC," ORNL-4744, Oak Ridge National Laboratory (1972)
4. J.W.WILSON, L.W.TOWNSEND, J.E.NEALY, S.Y.CHUNB, S.HONG, S.L.LAMKIN,

- B.D.GANAPOL, F.KHAN and F.A.CUCINOTTA, "BRYNTRN: A Baryon Transport Model," NASA Technical Paper, 2887 (1989)
5. J.E.NEALY, J.W.WILSON and W.TOWNSEND, "Preliminary Analyses of Space Radiation Protection for Lunar Base Surface System," SAE Technical Paper Series, 891487 (1989)
 6. "MCNP; Monte Carlo Neutron and Photon Transport Code," CCC-200, RSIC, Oak Ridge National Laboratory (1983)
 7. J.W.WILSON, L.W.TOWNSEND, B.GANAPOL, S.Y.CHUN and W.W.BUCK, "Charged-Particle Transport in One Dimensional," Nucl. Sci. and Eng., 99, 285 (1988)
 8. J.W.WILSON, L.W.TOWNSEND, B.D.GANAPOL, S.L.LAMKIN, "Methods for High-Energy Hadronic Beam Transport," Trans. Ame. Nucl. Soc., 56,271 (1988)
 9. K.OISHI, Y.IKEDA, H.MAEKAWA and T.NAKAMURA, "Experiment and Analysis of Neutron Spectra in A Concrete Assembly Bombarded by 14 MeV Neutrons," Nucl. Sci. and Eng., 103, 46 (1989)

TABLE I
Compositions of the Shielding Materials Used for Calculations

Element	Regolith	Concrete
H	1.93E+21*	-----
O	1.75E+22	1.74E+22
Mg	-----	7.73E+20
Al	4.02E+21	3.54E+21
Si	4.01E+21	4.74E+21
Ca	2.47E+21	1.91E+21

* Read as 1.93×10^{21}

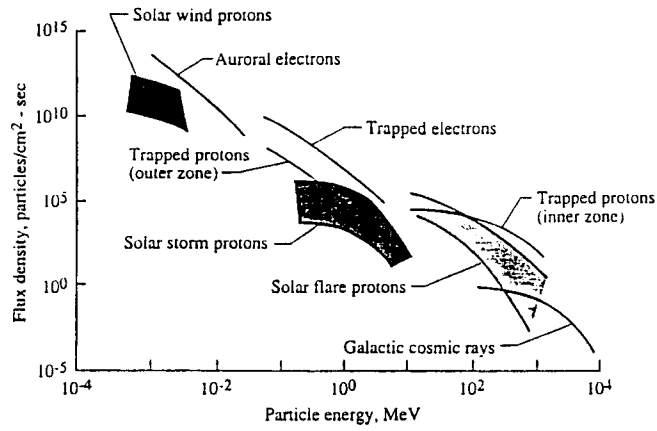


Fig.1 Space-radiation environment.

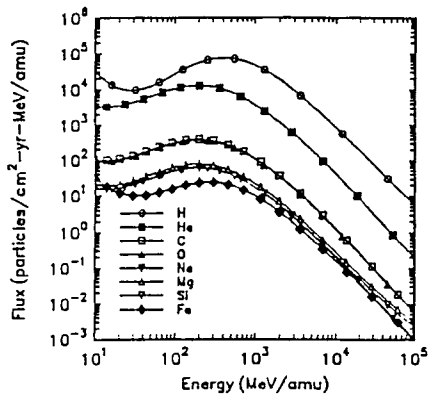


Fig.2 Differential flux spectra for galactic cosmic rays at solar minimum.

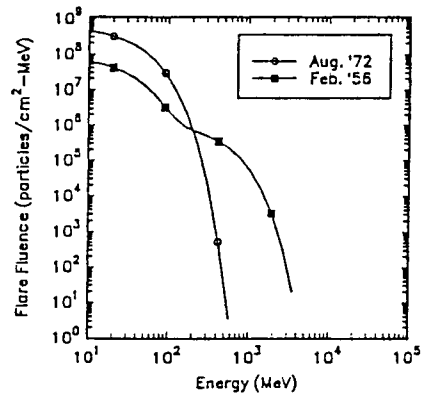


Fig.3 Event-integrated proton fluence spectra for the February 1956 and August 1972 solar proton events.

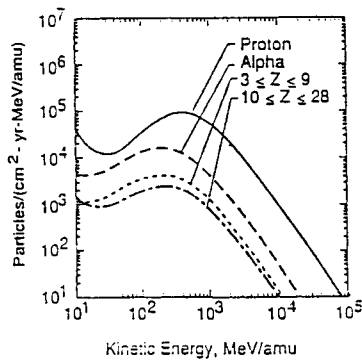


Fig.4 Annual flux for constituents of the interplanetary galactic cosmic ray.

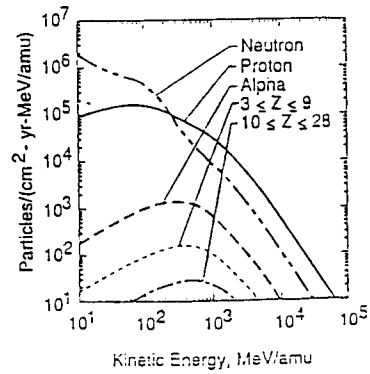


Fig.5 Annual flux variation with energy for particles at 50 cm depth in regolith.

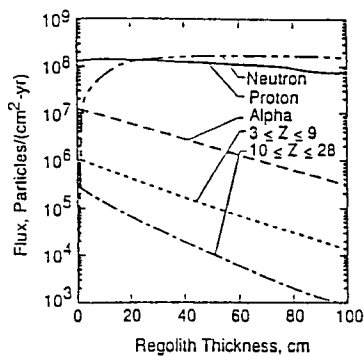


Fig.6 Annual variation of energy integrated particle flux as a function of thickness.

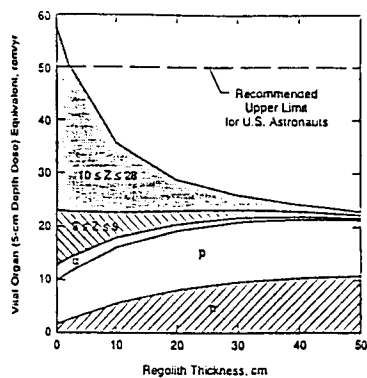


Fig.7 BFO annual dose equivalent as a function of regolith thickness.

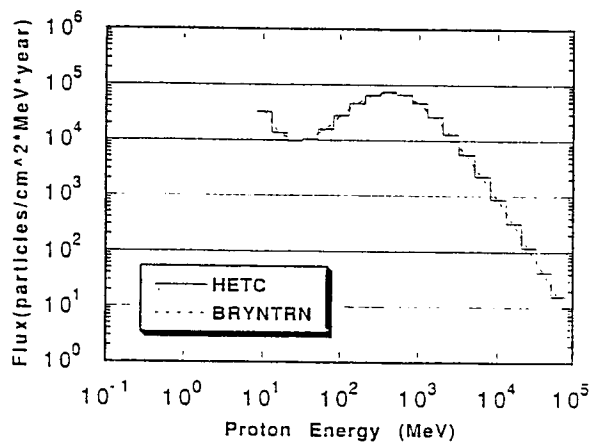


Fig.8 Incident proton spectra.

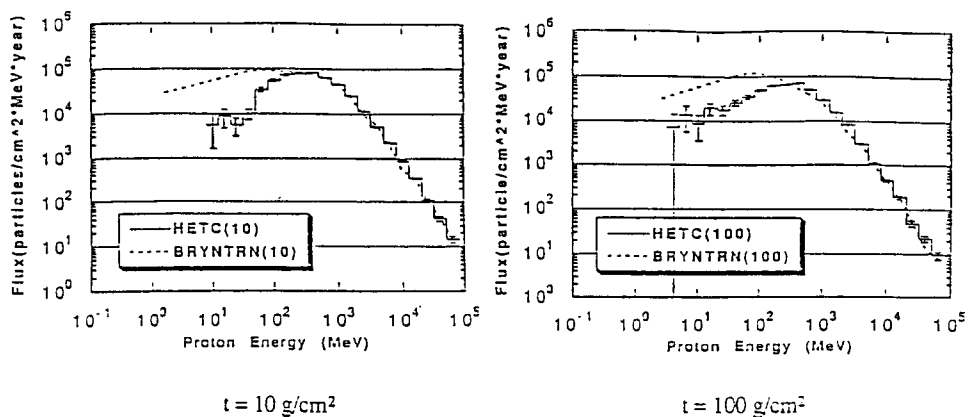


Fig.9 Calculated proton spectra by BRYNTRN and HETC-MCNP.

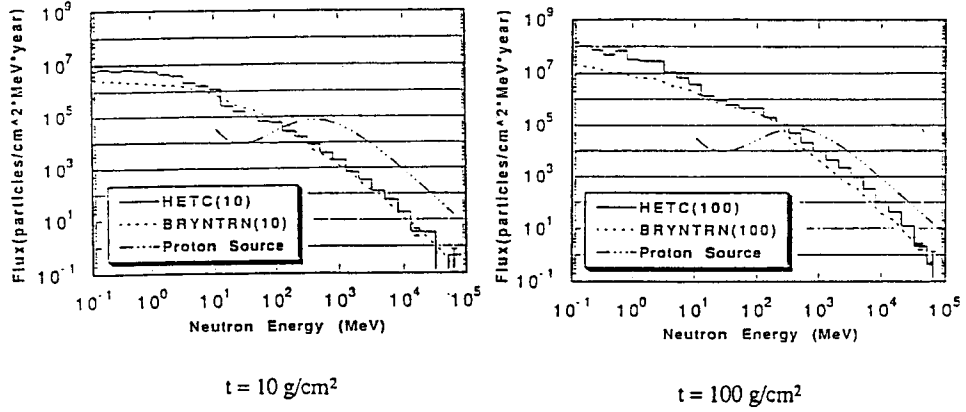


Fig.10 Calculated neutron spectra by BRYNTRN and HETC-MCNP.

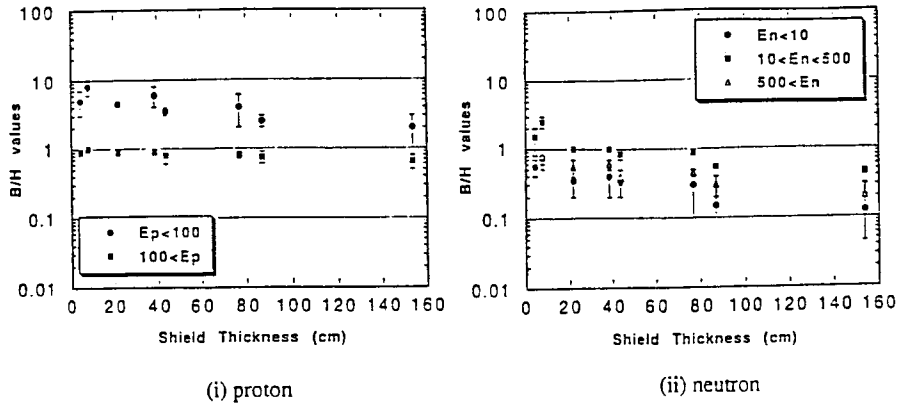


Fig.11 Ratios of BRYNTRN to HETC-MCNP values vs. shield thickness.

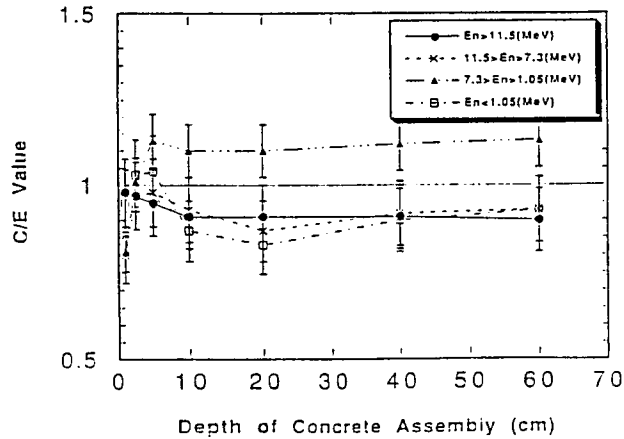


Fig.12 Ratios of calculated results to experimental.