

1. Accelerator Breeding

原研 中原 康明

加速器による核燃料増殖⁽¹⁾については塚田⁽¹⁾, 加速器による核燃料再生については高橋⁽²⁾による解説があるので, ここではできる限り重複を避け, 先ず, BNLにおける線型加速器の軽水炉燃料サイクルへの導入のシナリオと加速器原子炉の概念設計について簡単に述べ, 次に原子炉核特性解析の基本となる核物理, 炉物理および核データについてやや詳細に述べる。

1. 軽水炉燃料サイクルへの加速器の導入

イエローケーキのコストを100\$/lbとすると, 米国内の有効U資源は約 1.5×10^6 トンと推定されている。(3×10^6 トンとする向きもある) 軽水炉のみによる throwaway 方式では長期にわたる電力需要をまかなうことはできない。高速増殖炉導入の遅延に伴い, 軽水炉の利用期限を延長するための案として提案されているのが燃料再生炉 LAFR (= Linear Accelerator Fuel Regenerator) である。⁽³⁾ これは Linac を用いて加速された1~1.5 GeV, 300mAの陽子ビームを用いて, 重い原子核 (Pb-Bi) からなる標の中で破砕反応によって発生する大量の中性子 (Pb-U系で陽子1個あたり約40個の中性子) によって親物質を核分裂性物質に変換するものである。

現在軽水炉では30,000 MWD/tonの燃焼が可能で, この場合使用済み燃料中には核分裂性物質が2%含まれている。BNLのシナリオは次の通りである。(1)30,000 MWD/t燃焼燃料または2%濃縮Uを用いて加工した軽水炉燃料をLAFRに一年間装荷し, 等価濃縮度3.2%にする。(2)これを軽水炉に戻し, 30,000 MWD/ton 燃焼する。60,000 MWD/ton まで燃したら, 貯蔵にまわす。1基のLAFRで1年間に約1トンのPuが生産され, 3基の1000 MW(e)軽水炉を賄うことができる。Fig. 1に示したように, (1-LAFR)+(3-PWR's)で, 天然ウラン資源の利用率を3.6倍にできる。

(1) 塚田甲子男: 原子力学会誌, vol. 20, No. 8, 533 (1978)

(2) 高橋 博: 炉物理連絡会会報「炉物理の研究」 26号 (1978. 12)

(3) P. Grand and H. J. Kouts (Ed): BNL-50838 (1978)

NUCLEAR POWER GROWTH PATTERNS

EFFECT OF LAFR SYSTEMS (SMALL U_3O_8 SUPPLY)
15 $GW(e)$ /YEAR GROWTH RATE

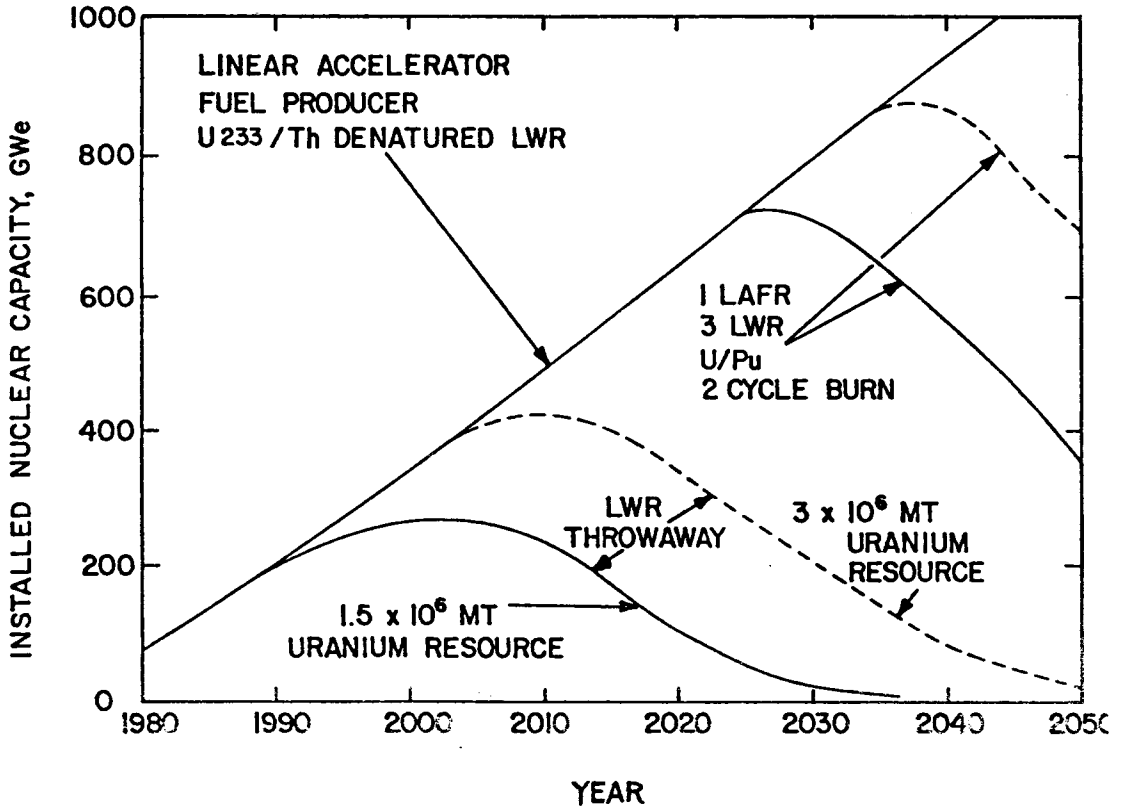
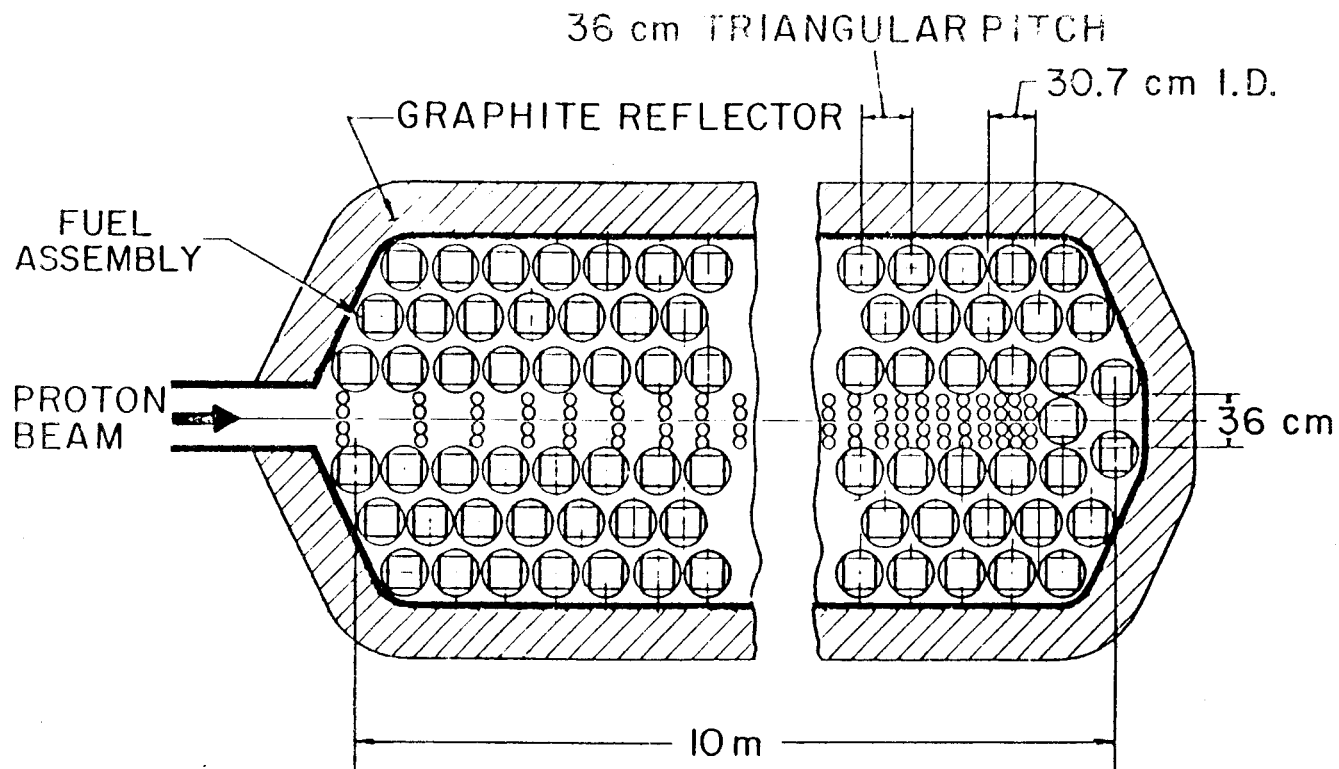


Fig. 1



PWR TYPE TARGET ASSEMBLY
CROSS SECTION

Fig. 2

II. BNLにおける燃料再生炉の概念設計

LAFRの断面図がFig. 2に示されている。⁽³⁾ 陽子ビームが直接当たる標的は液体鉛-ビスマスである。標的-燃料アセンブリ内で起る核反応輸送過程の概略はFig. 3に示されている。15MeV以上の計算は核子-中間子輸送コードNMTCで行われる。⁽⁴⁾ NMTCには巨視的な媒質中の粒子輸送コードOSR, 原子核内の核子-中間子カスケードコードBERT⁽⁵⁾, 励起された原子核からの粒子蒸発コードEVA P⁽⁶⁾が主要ルーチンとして含まれている。15MeV以下に減速された中性子の輸送計算はTWO TRANまたはMORSEを用いて行われる。

核設計計算コードシステムはFig. 4に示されている。このコードシステムを用いてLAFRについて種々の燃料アセンブリについて行った予備計算の結果がTable 1にまとめられている。天然ウラン-軽水系では陽子1個あたり40個以上の中性子が発生し、約1トンのPuが得られることが分る。

コスト面では加速器建設が必要なので、資本費は軽水炉の1.4倍となるが、燃料費は逆に1/4程度で済むため、1986年における全コストは、軽水炉、LAFR-軽水炉に対し、各々43.5, 46.1 Mills/KWH(e)と推定される。⁽³⁾

III. 高エネルギー陽子による標的系での中性子発生過程のシミュレーション

媒質に入射した陽子はイオン化損失によってエネルギーを失うので、十分大きなエネルギーを与えておく必要がある。一方、あまりエネルギーが大き過ぎると、中間子発生が多くなり、中性子発生は増えず、これらの事情から1~1.5GeVの陽子が用いられる。

100MeV以上では陽子の波長は原子核内の平均核子間距離より短くなるので、二体衝突近似を用いる。原子核を同心球殻領域に分け、各領域内では核子密度やポテンシャルは一定とする。運動量分布は各領域で縮退したフェルミ分布に従うとする。

核子-核子散乱断面積には実験値にフィットさせた半実験カーブを用いる。 π 中間子の生成を伴う衝突断面積はSternheimer and Lindenbaumのアイソバー・モデルで計算する。⁽⁷⁾ NMTCでは計算ルーチンISO Bが用意されている。Fig. 5にpp衝突断面積が示されている。400

(4) T.W. Armstrong and K.C. Chandler : ORNL-4736

(5) H.W. Bertini : ORNL-3383 (1963)

(6) L. Dresner : ORNL-TM-196 (1962) ; M.P. Guthrie : ORNL-TM-3119 (1970)

(7) R.M. Sternheimer and S.J. Lindenbaum : Phys. Rev., 123, 333 (1961)

MeVあたりから全断面積が増えるのは、 π の発生によるものである。

π 中間子-核子散乱断面積は phase shift analysis の手法で導かれた理論式で与えられる。⁽⁵⁾
 π 吸収断面積には Metropolis らが Brueckner, Serber and Watson モデルで導いた式を用いる。⁽⁸⁾ 660MeVの陽子がPuに入射した時の核内カスケードの様子が Barashenkov らの論文から引用した Fig. 6 に示されている。⁽⁹⁾

カスケード過程で粒子が原子核から飛び出した後には、励起状態にある残留核が残る。計算の手順としては、次にこの残留核からの粒子 (n, p, d, t, ^3He , α) 蒸発計算を Weisskopf の統計モデルに基づいて行う。⁽⁶⁾ 複合核モデルにおける単位密度には Le Conteur の式が採用されている。⁽⁶⁾

粒子のエネルギー、運動量は相対論的動力学によって定められるが、値はパウリの排他律で許容されるものかどうかチェックされる。結合エネルギーについては Wapstra, Huizenga, Mattuch や Peelle and Aebersold の数値表が用いられている。⁽¹⁰⁾ 荷電粒子のイオン化損失による減速は連続減速近似で取扱われる。

N. 解析計算：実験との比較

Fig. 4 に示されているコードシステムの計算精度をチェックするためにソ連の Dubna で行われた Fig. 7 の天然ウラン体系実験の解析を行った。中性子源としての比較的小さな標的からの漏洩中性子の測定はいくつかの研究所で行われているが、⁽¹¹⁾ 増殖系としての大きな標的系における測定はこの Vasil'kov らのものが唯一であると思われる。⁽¹²⁾ Fig. 9 に陽子1個あたりの平均中性子発生数の陽子入射エネルギーによる変化が比較されているが、我々の計算値は大雑把にいて約20%過小評価になっている。Barashenkov らの計算値には体系からもれた中性子も含まれているので、厳密な比較にならないが、Vasil'kov らの図そのままに引用しておいた。Fig. 9 には ^{239}Np の個数密度分布について Vasil'kov らの測定値と我々の計算値の比較がされている。陽子源に近い所では計算値は大きめに、遠い所では小さくなる傾向が見られる。散乱の異方性は P_3

(8) Metropolis et al. : Phys. Rev., 110, 204 (1958)

(9) V. S. Barashenkov et al. : Sov. Phys. Vsp., 16, 31 (1973)

(10) P. W. Peelle and P. M. Aebersold : ORNL-TM-1538 (1966)

(11) 例えば, H. J. C. Kouts and M. Steinberg (Ed.) : "Proc. of Information Meeting on Accelerator Breeding", CONF-770107 (1977)

(12) R. G. Vasil'kov et al. : Atomnaya Energiya, 44, 329 (1978)

まで考慮されているが、異方性はもっと強いと考えられる。Fig. 8に見られる不一致の原因については、高エネルギー領域における核分裂効果、断面積データの精度、モンテカルロ法における統計誤差等いろいろ考えられるが未だ十分な吟味はなされていない。 ^{238}U の σ_f がFig.10に示されているが、40MeV位までしかデータがない。

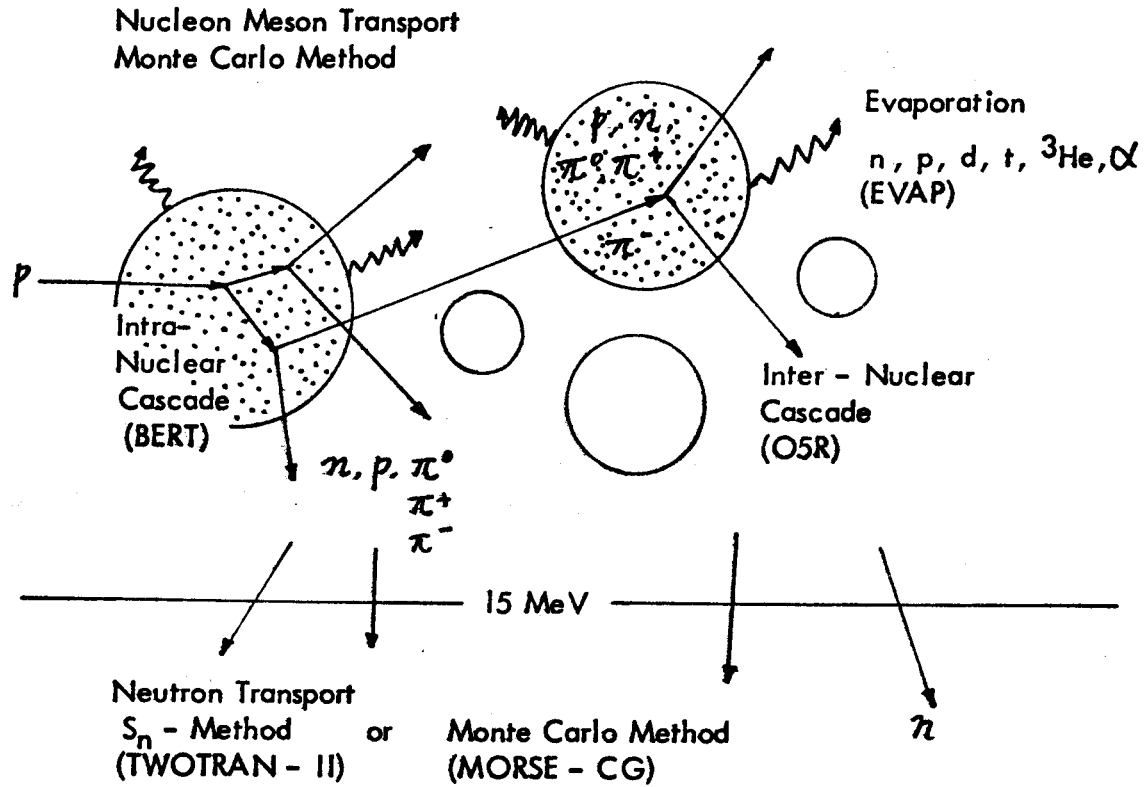


Fig. 3

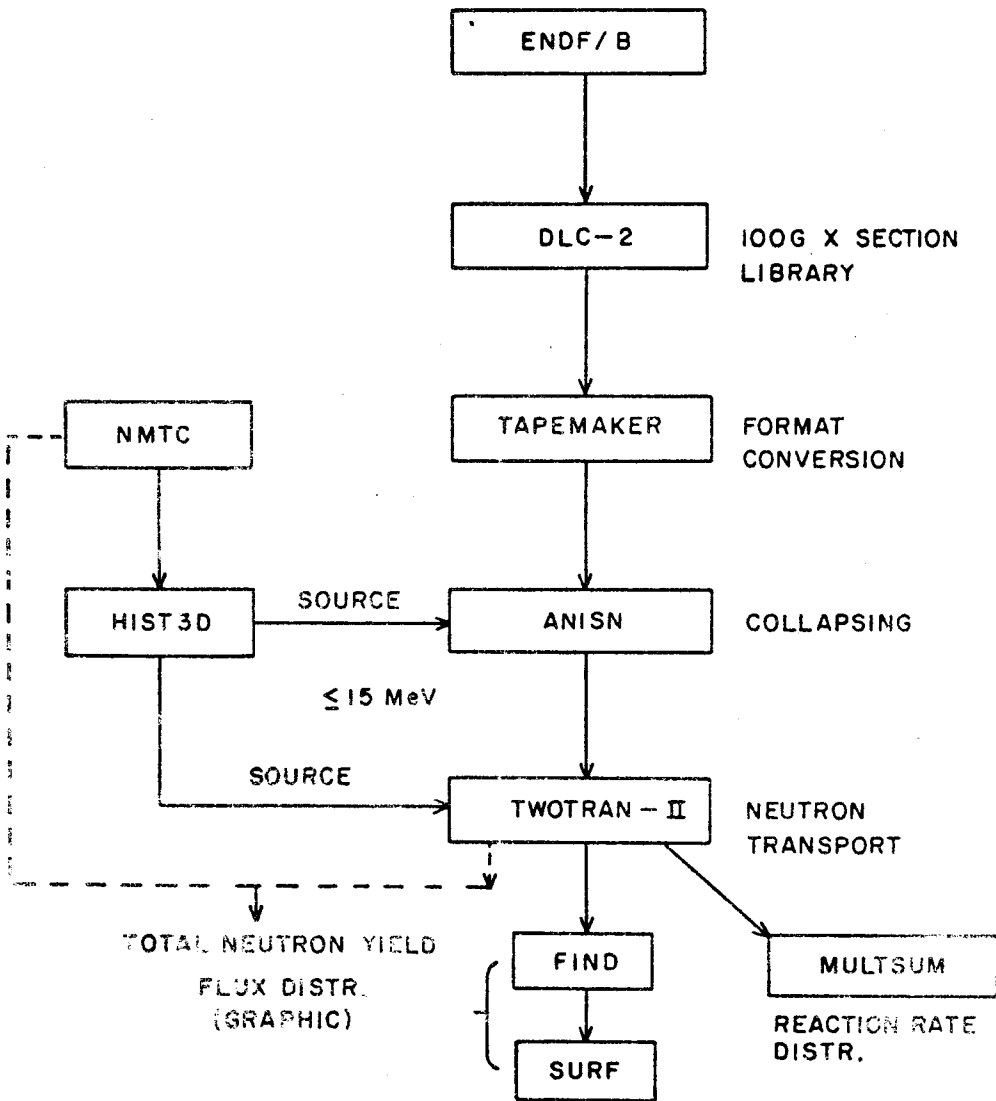


Fig. 4 NEUTRONICS PART OF BNL CODE SYSTEM FOR LAR'S

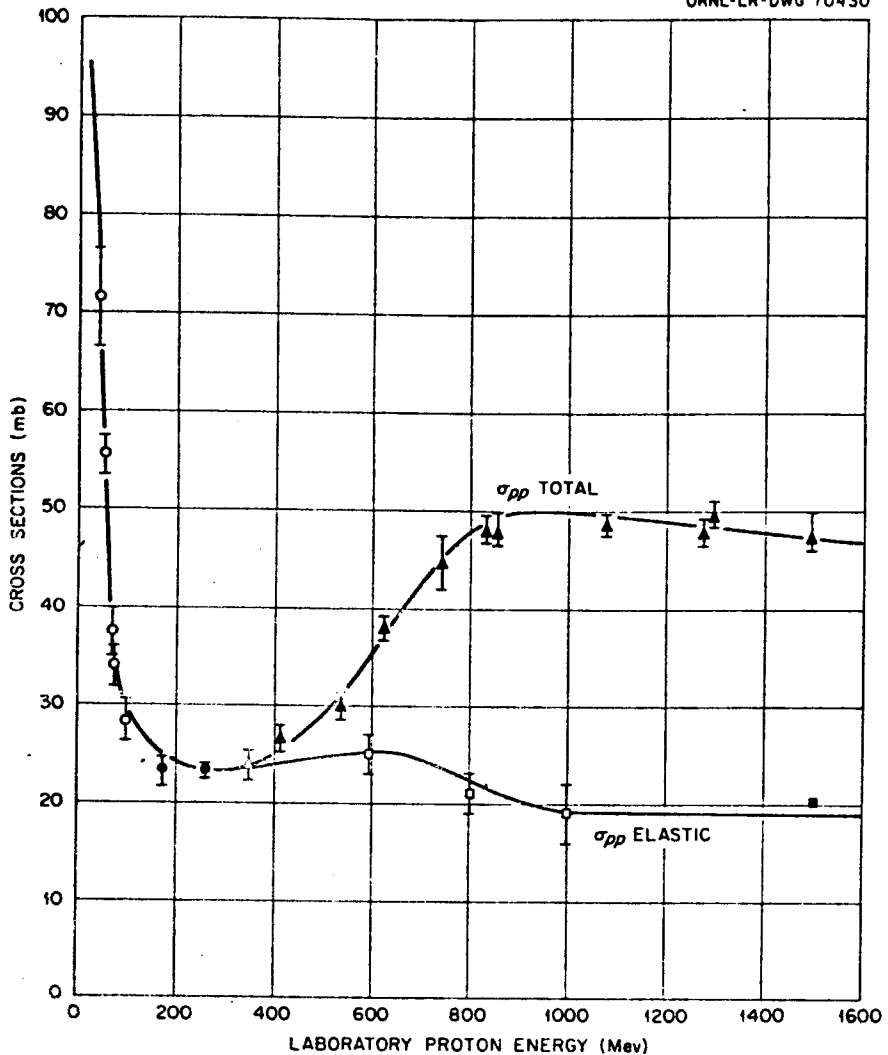


Fig. 5 . Proton-Proton Total and Elastic Cross Sections vs. Energy. \circ U. E. Kruse, J. M. Teem, and N. F. Ramsey, Phys. Rev. 101, 1079 (1956); \bullet , O. Chamberlain and J. D. Garrison, Phys. Rev. 95 1349(L) (1954); Δ , O. Chamberlain, E. Segre¹, and C. Wiegand, Phys. Rev. 83, 923 (1951); \blacktriangle F. F. Chen, C. P. Leavitt, and A. M. Shapiro, Phys. Rev. 103, 211 (1956); \square L. W. Smith, A. W. McReynolds, and G. Snow, Phys. Rev. 97, 1186 (1955); \blacksquare W. B. Fowler et al., Phys. Rev. 103, 1479 (1956).

H.W. Bertini : ORNL-3383(1963)

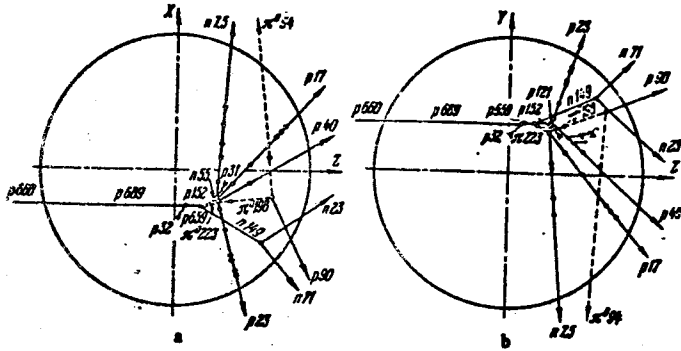
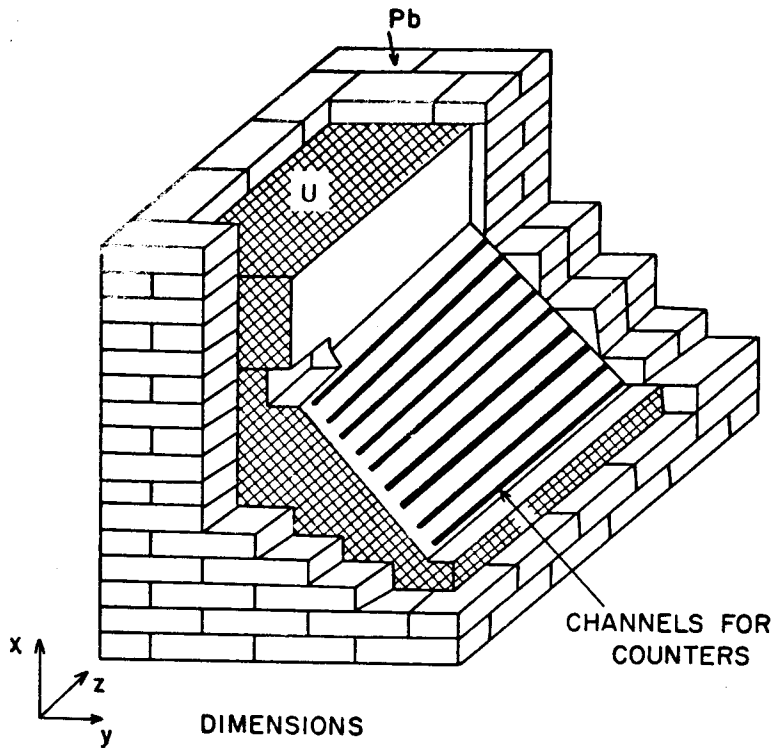


Fig. 6. Intranuclear cascade initiated in Ru^{100} by a 660-MeV proton. a) Projection on the X, Z plane; b) projection on the Y, Z plane. The numbers with the particle symbols are their kinetic energy in MeV. The circles in the particle trajectories are the points of collisions which occur but were forbidden by the Pauli principle. The wavy lines indicate trajectories of recoil nucleons which stopped inside the nucleus, and the dashed lines are π -meson trajectories.



DIMENSIONS

CORE: $56 \times 56 \times 64 \text{ cm}^3$

BEAM HOLE: $8 \times 8 \times 16 \text{ cm}^3$

WIDTH OF Pb WALL: 10 cm OR 20 cm

PROTON BEAM DIAMETER: 4~5 cm

Fig. 7 TARGET IN RUSSIAN EXPERIMENTS

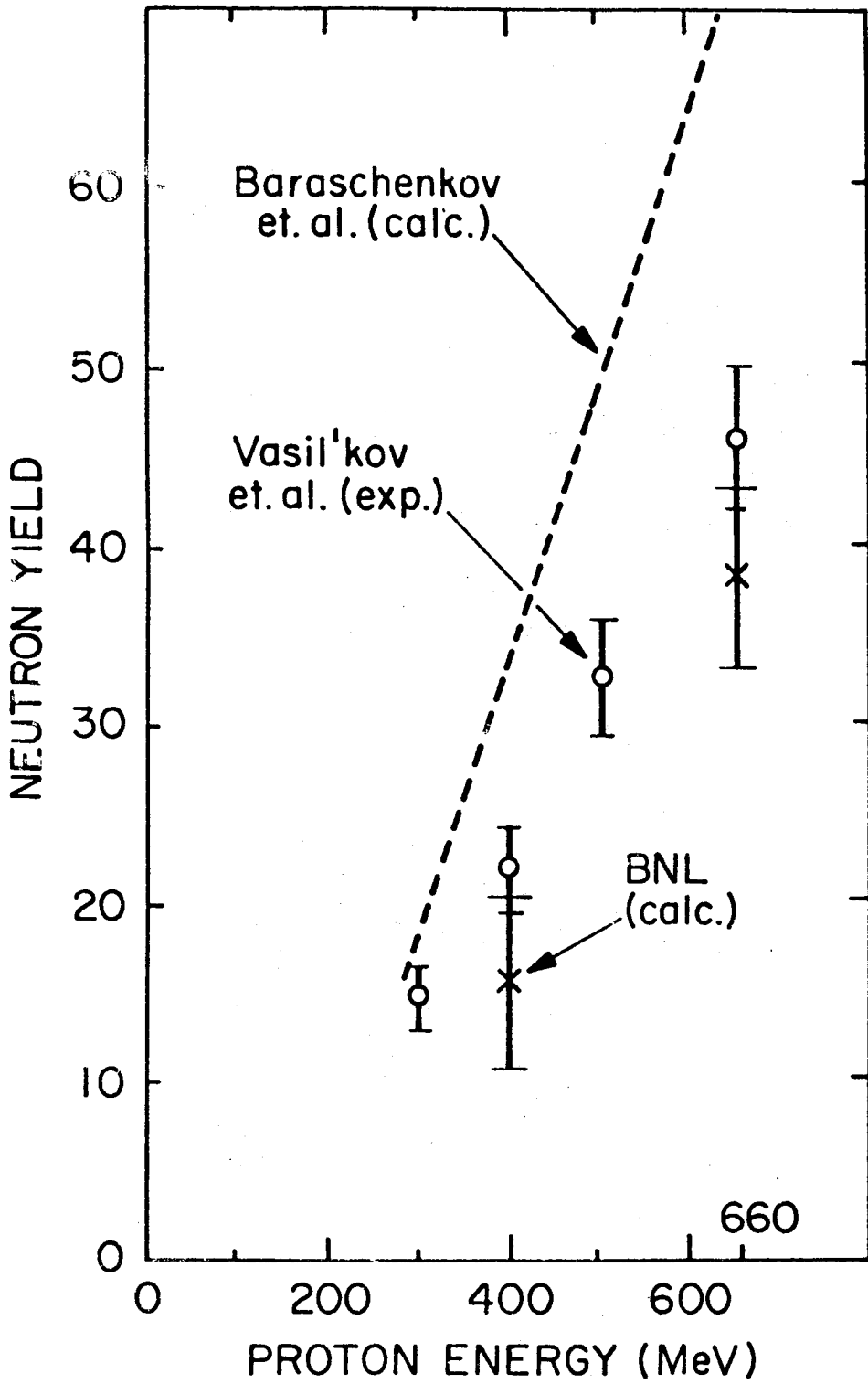


Fig. 8

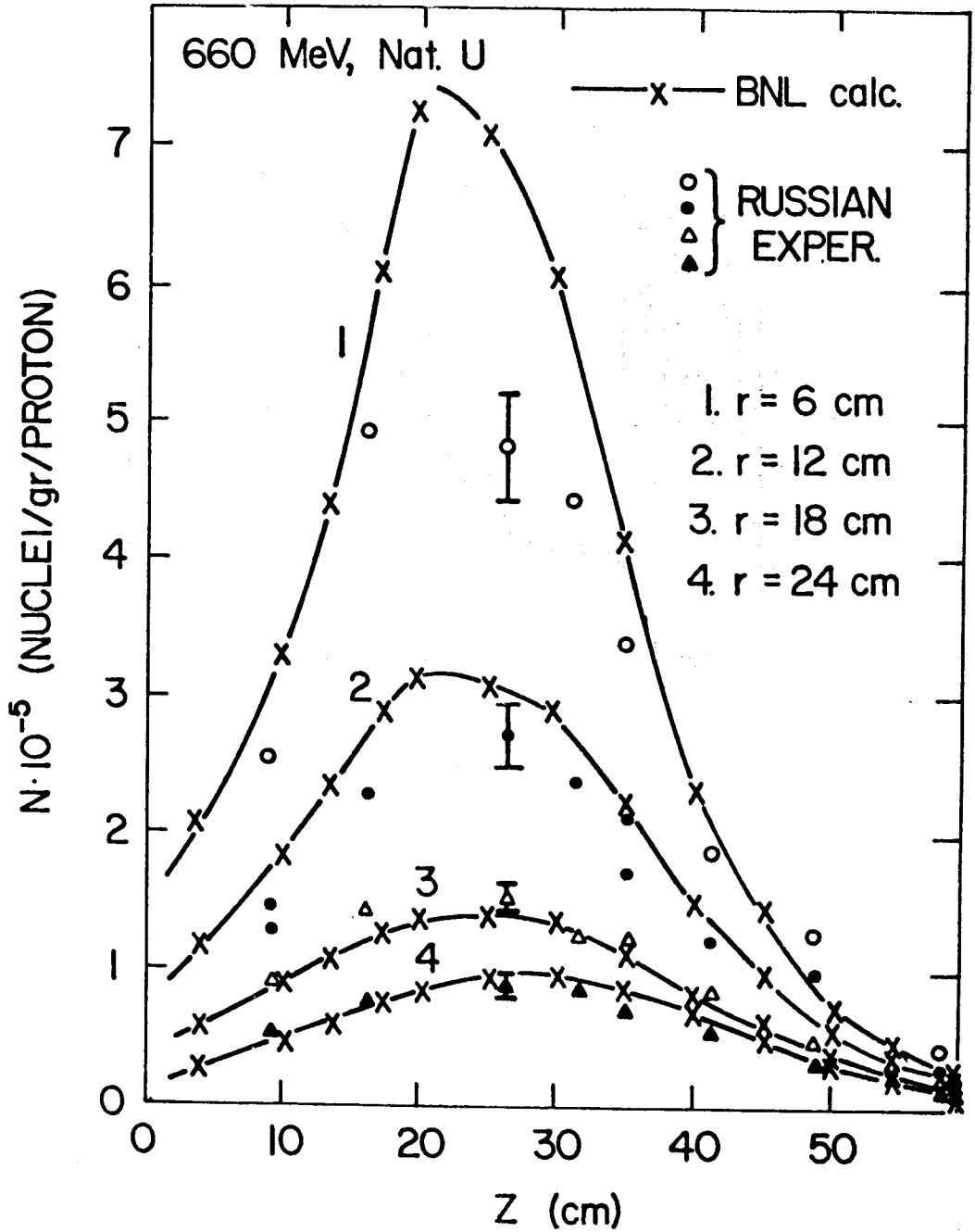


Fig. 9 ^{238}U (n, γ) REACTION DISTRIBUTION
 N = NUMBER OF ^{239}Np NUCLEI

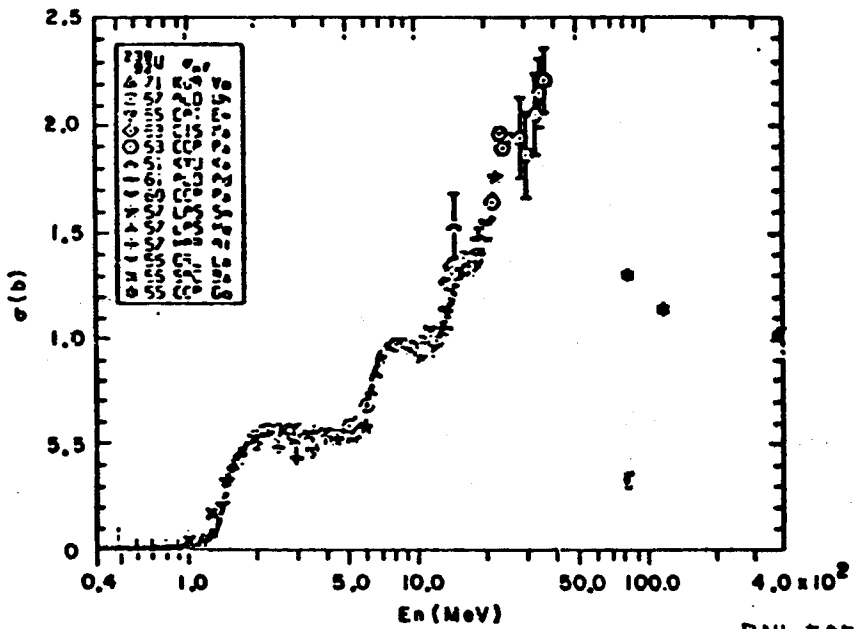


Fig. 10

Fission cross section of ^{238}U .

BNL 50592
(1976)

Table 1 INITIAL FISSILE FUEL PRODUCTION RATES FOR
 Pb-Bi TARGET - FUEL ELEMENTS BLANKET
 (0.3A - 1.5 GeV PROTON ACCELERATOR)

DESIGN NUMBER	FERTILE MATERIAL	COOLANT	DENSITY OF COOLANT (G/CC)	INITIAL NEUTRON YIELD YN (INCLUDES FISSION REACTION)	INITIAL PRODUCTION RATE OF FUEL MATERIAL (KG/YR)*
1	UO ₂ (NAT)	D ₂ O	0.7	35.9	Pu - 1010
2	ThO ₂	D ₂ O	0.7	31.1	U ²³³ - 850
3	UO ₂ (NAT)	H ₂ O	0.7	49.4	Pu - 1000
4	UO ₂ (NAT)	H ₂ O	0.35	43.9	Pu - 1050
5	UO ₂ (NAT)	H ₂ O	0.175	43.3	Pu - 1070
6	ThO ₂	H ₂ O	0.7	31.0	U ²³³ - 850
7	ThO ₂	H ₂ O	0.35	32.4	U ²³³ - 890
8	ThO ₂	H ₂ O	0.175	32.7	U ²³³ - 900

MODERATOR/FUEL VOLUME RATIO = 0.8

*BASED ON 80% PLANT FACTOR