

WG 活動紹介(I)

P K A スペクトルWG

(東芝) 飯島 俊吾

このWGは1989年4月に発足した。メンバーは材料物性, 放射線医学, 核物理, 教育, 核データ, 炉物理などの広いスペクトルで構成されている。

仕事のスコープはJENDLに基づいて Kerma factor, DPA 断面積, PKA スペクトルの計算・評価を行い, データファイルを作成することである。中性子エネルギーは 20 MeV 以下が主目標であるが, 照射損傷研究からは 50 MeV まで, 中性子治療からは 200 MeV までのデータが要求されている。20 MeV 以上ではJENDLデータは無いので, 本格的には Post JENDLの問題として提起されるのが本筋であろう。

1. 研究の背景と意義

この分野は従来我々には馴染みが薄いので, 蛇足乍ら始めに背景を述べる。

Kerma Factor

Kerma (kinetic energy release in matter) についてはすでに1950年には遅い中性子および 14 MeV 中性子の生体への効果という見地から研究が始められている。中性子 Kerma は中性子が物質と反応したさい, その場所で吸収されるエネルギーであり, 放射線生物学, 放射線治療, 検出器応答, 発熱量評価などに用いられる。中性子治療では 200 MeV 程度までのデータが要求されている。

Kerma factor は物質1グラムあたりの反応の反跳原子と放出荷電粒子の運動エネルギーの和で定義される。入射中性子エネルギー E_N に対して,

$$KF(E_N) = N \sum_X (\bar{E}_D + \bar{E}_K) \sigma_X(E_N) \quad (\text{eV}\cdot\text{b}/\text{g}) \quad (1)$$

ここで N は 1 gr 当りの原子数, E_D, E_K はそれぞれ実験室系での反跳原子エネルギー, 放出荷電粒子エネルギーの平均値, $\sigma_X(E_N)$ は反応断面積である。Gray (1 kg あたりの吸収線量) との変換は $1 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g} = 1.6022 \times 10^{-10} \text{ Gy} \cdot \text{cm}^2$ である。

1970年代になってから研究は極めて活発化し, 1980年代後半に入っても多くの計算, 測定研究が各国から発表されている。計算は NBS の Caswell et al.(1980,1982)

メンバー: 喜多尾(放医研), 高橋(阪大), 山野(住友原子力), 有賀, 山内, 杉, 千葉(原研), 川合, 飯島(東芝), 柴田(原研/現 NEADB)

のものが名高い。彼らは 0 ~ 30 MeV での H, Li-6, Li-7, B, C, N, O, F, Na, Mg, K, Si, P, S, Cl, Ar, K, Ca, Fe の kerma factor を計算し数値表を与えており、また、生物組織、筋肉、骨、プラスチック、ナイロン、空気、ルサイト、アセチレン、エチレン、炭酸ガスなどについても合成した値も示している。UCRL の Howerton(1984) も新しい EN DL に基づいた計算結果を発表している。Fig. 1 は鉄の kerma factor の Caswell, Howerton, および J E N D L - 3 による今回の計算値を比較したものである。

PKAスペクトルおよびDPA断面積

DPA(Displacement per Atom) 断面積は中性子が結晶格子から原子を弾き出す断面積で、材料の照射損傷の評価パラメータとして欠かせないものと成っている。DPA 断面積は通常 ASTMの標準NRTモデルで

$$\sigma_{DPA}(E_N) = (0.8/2\varepsilon_d) \int [E_p / (1 + kg(E_p))] \sigma(E_N, E_p) dE_p \quad (2)$$

と書かれる。 ε_d は格子原子弾き出しエネルギー、 $k, g(E_p)$ は Lindhard-Robinson の電子的エネルギー損失に対する補正因子、 E_p は反跳原子(primary knock-on atom) エネルギーである。 $\sigma(E_N, E_p)$ は 実験室系での PKA スペクトルであり、重心系での断面積から反応の kinematics を通じて実験室系に変換して得られる。

DPA 断面積については Doran-Graves(1976) の計算がこの分野のはしりであり、Al, V, Cr, Fe, Ni, Cu, Zr, Nb, Mo, Ta, W, Pb, 18Cr-10Ni-SS について 20 MeV 以下で DPA 断面積, PKAスペクトルを与えている。

損傷パラメータの基礎量として DPA 断面積の他に、照射による (n,H), (n,He) などのガス生成反応、核種交換断面積も重要とされてをり、また、もっと詳細な照射関連の議論のためには反跳原子スペクトル自身も必要と考えられている。

Fig. 2 は $E_N = 15$ MeV での鉄の弾性散乱による PKA スペクトルで J E N D L - 3 から計算したものである。Fig. 3 は鉄の DPA 断面積で、山野氏の RADHEAT-V4(ENDF/B-IV) による計算と J E N D L - 3 に荷電粒子スペクトルを補充した今回の計算との比較を示す。

2. 1989年度活動

作業を開始したばかりなので、問題の全体としての展望をつかむことに主点を置き、以下の項目の調査、検討を行った。

- (1) PKA/Kerma データの国内外での研究状況、データニーズ、適用のレビュー、調査
- (2) 今後の作業のための計算手法、基礎データの調査、整備
- (3) Fe についての 50 MeV までの計算結果の報告と検討

この(1)については JAERI-M レポートとして刊行を進めており、内容は、国内外での研究状況、放射線医学における kerma factor、核融合炉材料の照射損傷効果に関するデータベース、照射損傷のカスケードモデル計算、PKA/Kerma データのファイル化などの項目を予定している。

(2)については、荷電粒子反応データ、軽い核の中性子光学ポテンシャル、原子弾き出しエネルギーなどの調査を行った。

(3)の Fe(<50 MeV) についての計算では一応次ぎのような結論を得ている。

- a. Kerma factor は 20 MeV 以上では主に放出荷電粒子で定まり、荷電粒子放出断面積とその平均エネルギーの積で表される。
- b. DPA 断面積は、弾性散乱による反跳と反応時の第1複合核の運動エネルギー項が支配的であり、従って、中性子光学ポテンシャルでほぼ定まる。
- c. 20 MeV 以上では反応毎の Kerma factor, DPA 断面積の成分を求めることは無理である。また、3粒子以上の放出がある時には、PKA スペクトルの解析的計算は極めて困難。

3. 1990年度活動予定

- (1) 上の(1)で述べた JAERI-M レポートの刊行
- (2) 主要構造材の中重核について $E_N < 20$ MeV での計算、ファイル化(*)
- (3) 中重核について 50 MeV への計算の拡張
中性子データの不足を荷電粒子入射反応データを用いて補う。(**)
- (4) 3粒子以上放出時の PKA スペクトル計算法の検討 (Monte-Carlo ?)
- (5) 軽い核の計算法の調査、開発とテスト計算
- (6) 100 MeV 程度までの中性子光学ポテンシャルの適否の検討(**)
- (7) 軽い核および合金、セラミックスでは Lindhard-Robinson の式の修正が必要とされており、調査、検討
(*) 化合物、合金などの合成値も含める。自己遮蔽因子も含めての格納形式の検討。
(**) 他のWGでの作業にも期待。

4. 今後のこと

Kerma factor, DPA 断面積ともかなりの計算値が発表されているが、計算値間にはしばしば著しい差が見られる。従来の計算では例外なく、放出粒子スペクトル(荷電粒子も含めて)についてかなり粗い近似が用いられており、また、核データファイルに無いデータを如何に推定したかが必ずしも明確にされていない。従って、JENDLに基づく PKA/Kerma データを作成することは十分な意義があり、必要であると考えられる。今後ENDF, JEFも多分同様に進めるであろうからなおのことである。

いづれにせよ、この分野の問題に基礎データから本格的に取り組むのはわが国では始めてのことであり、従来の評価値と比較しながら研究を積むこと、また、方法を一つに絞らずに幾つかのアプローチを平行して行う余裕を持つことが必要と考えられる。

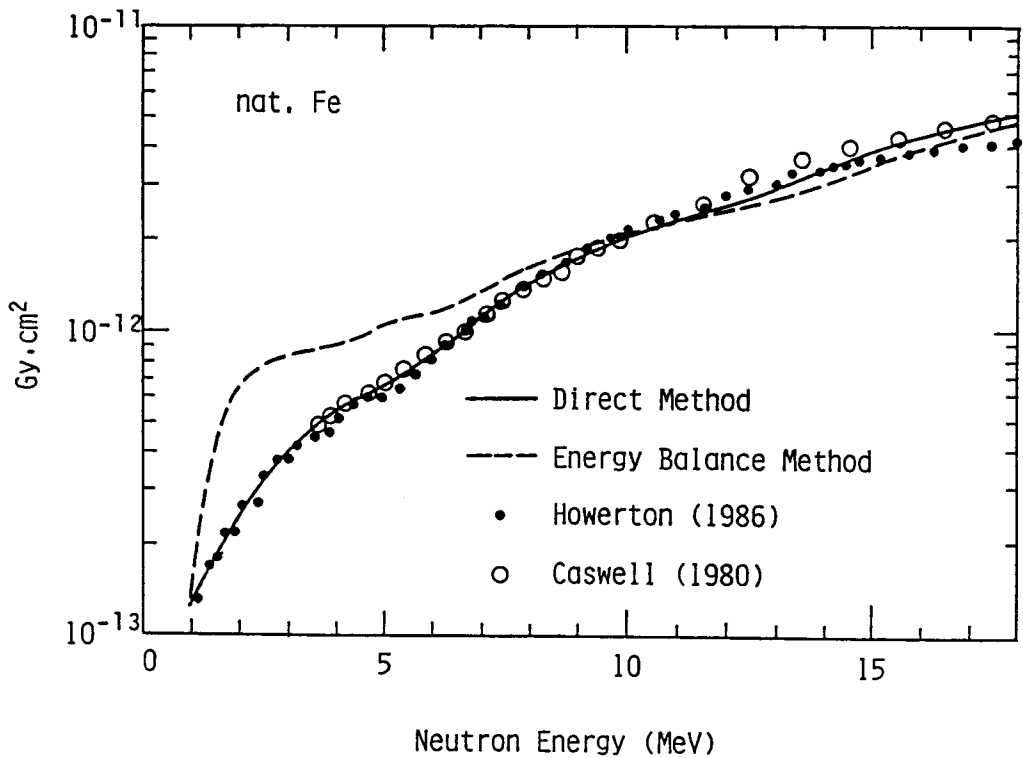


Fig. 1 Kerma Factor of Natural Iron. Comparison of the Present Calculations (— ; - - -) using JENDL-3 with those by Caswell et al. and Howerton.

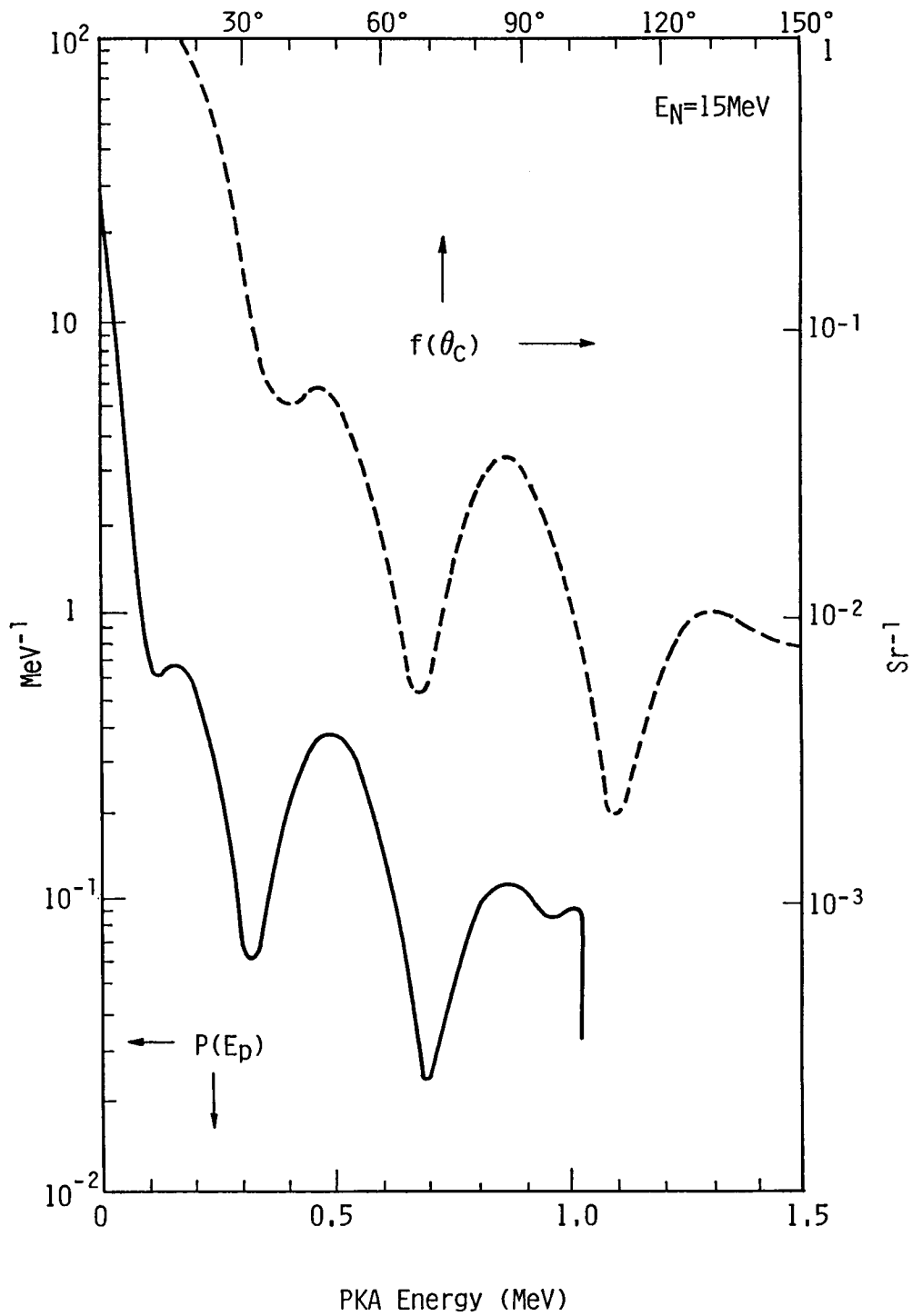


Fig. 2 Normalized PKA Spectrum and the Angular Distribution in C.M. System for Elastic Scattering from Iron at $E = 15$ MeV.

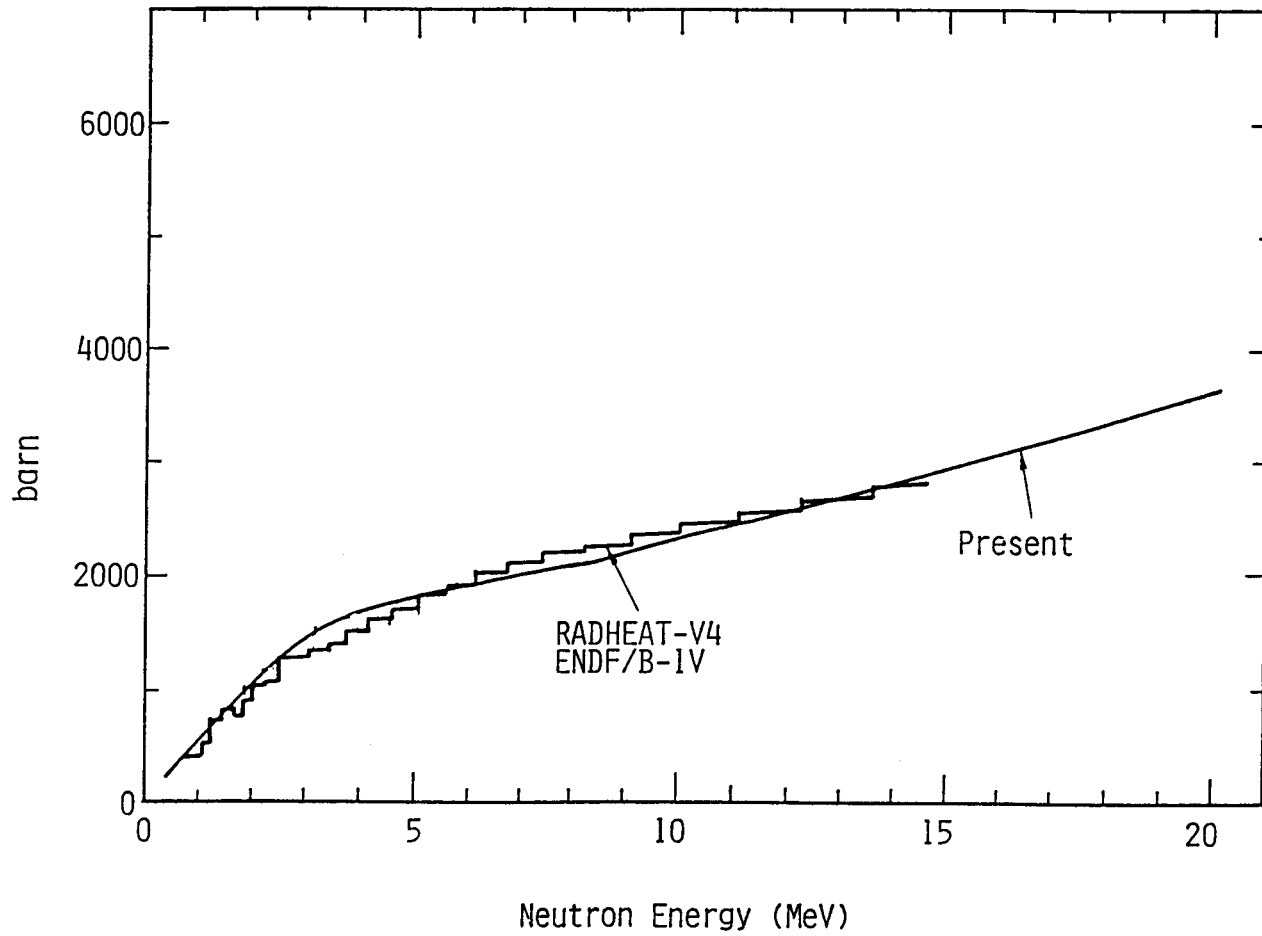


Fig. 3 DPA Cross Section of Natural Iron. Comparison of the Present Calculation using JENDL-3 and the RADHEAT-V4 Calculation using ENDF/B-IV.