

「ENSDFの二三の問題点」

原研 山口勇吉・外川織彦

評価済核構造データ・ファイル(ENSDF)は、その名称が示す様に、核構造に係る測定データを収集評価したものとして知られ、国際的ネットワークの下で定期的に新しい文献値を吟味しながら、遂次改訂されている。又、この評価データは、一定の機械的手続きを経て Nuclear Data Sheet として刊行されているもので、核構造研究分野の最新情報の集大成と云える。このデータ・ファイルは、その性格上、極めて基礎的研究領域のものであるが、これに含まれる崩壊データは、原子力、核医学など応用研究に対しても直接の寄与を与えるものとして期待される。この期待はENSDFがこれら応用分野に広く用いられている放射線データ・ブックのうち、最近刊行されたICRP-pub. 38, Table of Radioactive Isotopes に、ENSDFを原情報として用いていることから窺われる。

応用分野で用いられる放射線データは、一般には、上記の放射線データ・ブックあるいは何らかの中間ファイルの作成といった加工された情報を使用しているのが実情である。この事実は、ENSDFが定期的に改訂されているにもかかわらず最新情報がその都度中間的な段階へ取り込まれなければ、直接反映されないことを示唆する。事実、上記ICRP-Pub 38に収められた放射線データ及びこれを基に算出された放射能年摂取限度(ALI)は、1970年代後半、即ちこの核構造データ評価活動の初期に入手可能となったENSDFを原情報としており、最近のデータ評価の成果は取り込まれていない。

こうした状況を考える時、応用研究にとって特別な中間ファイルを用いることなく、ENSDFからの放射線データの直接の導出を行うならば、放射線データの使用の時点における最も新しく、しかも国際的に認知された原情報を使用することが可能となり、応用研究分野に取ってより信頼できる基礎が得られる。また、このことは、中間ファイルの作成といった煩雑な作業を除くといった経済的側面からみても得られるところは大きい。

しかしながら、こうした有利な側面がありながら、実際には、応用分野でのENSDFの直接の使用は稀である。この原因としては、データの構造の複雑さに加え、データの不備等、ENSDFファイルに解決すべき問題があり、専門家以外の使用を妨げている側面があるのは否定できない。筆者は、被曝線量算出用にENSDF

から放射線データを導出する計算プログラムRADCALの開発を行ったが、この過程でENSDFに含まれる種々の問題点に直面した。以下、ENSDF崩壊データの簡単な説明に続いて、これらの問題点について記述する。

(i) ENSDF崩壊データの構成

ENSDF崩壊データは、崩壊関式を数値データ化したものといえる。後の議論のために良く知られた ^{60}Co β^- 崩壊を例に簡単にその構造について述べる。図-1、図-2に夫々崩壊関式及び対応するENSDFデータ・セットを示す。図-2に見られる様に、崩壊データはIDカードから始まって、これに続く各レコードのうち、8カラム目に、P、L、B、Gが付されたレコード（以下Pカード、Lカード --- とよぶ）で、親核種のエネルギー準位、崩壊に関係する娘核種のエネルギー準位、 β 転移、 γ 転移に係わる物理量が記述される。これら物理量は図-1の崩壊関式に含まれる諸量に対応する。これとは別に、IDカードの直後のNの付されたレコードでは、B、Gカード中に与えられている β 線、 γ 線の強度を100崩壊当りに規格をする規格化定数、及び当該 data set に記述されている崩壊モードの分岐化が与えられている。

(ii) ENSDF崩壊データに含まれる崩壊関式の完全性

各々の崩壊データに含まれる物理的諸量等が、正しく記述されていることを判定する一つの方法として、崩壊関式の完全性（内的整合性）を調べることが考えられる。この内的整合性の最も単純な判定として、親核種からの転移強度の和及び娘核種の基底状態への転移強度の和が、取り扱っている分岐化に等しくなっているかどうかをみる。表-1に、1982年9月時点でのENSDF崩壊データについて、その評価条件を適用した結果を示す。

ENSDFに含まれる崩壊データ、2554*データ・セットのうち、ほぼ15%程度のデータでは、親核種からの転移強度が記述されていない。これは、このデータ・セットの評価・作成にあたって、入手可能な実験データが、崩壊関式を組み立てる上で不十分な情報しか与えていなかったことを示している。この種の崩壊データの多くは、Nカードが与えられていないものが多い。

* β^- 、 α 、IT、及び β^+ (EC) 崩壊のみに限定すると共に Pカードが欠けている崩壊データは除いた。

一方、転移強度が与えられている崩壊データについては、親核種からの転移強度の和についてみると、10%以上の相異を与えるものが、崩壊データの一割程度を占めており、こうした傾向は、娘核種の基底状態（もしくは、準安定状態）への転移強度についても同様である。

以上の簡単な解析から理解されるように、無視できない割合の崩壊データについて、その崩壊図式に内的不整合が認められる。次節で、その要因について、規格化定数の不備という視点から検討する。

(iii) Normalization factorの不備

上記の簡単な解析でみられた不整合の原因を、各崩壊データについてみると、これに含まれる相対的な転移強度を崩壊あたりの強度に変換する際に使用する規格化定数及び分岐化に問題のあるものが認められる。これらには、既に喜多尾氏によって指摘された ^{137m}Ba (IT-decay) における規格化定数の記入ミス（本誌 No. 23）によるものの他に、以下に述べる様に、規格化定数が空白として残され確定値が示されていないことによるものも多い。

表-1 に示した不整合の大きさが 1% 以内に収まる崩壊データ・セットも含めて、規格化定数の一部もしくは全てが空白とされている崩壊データが大部分を占める。崩壊データの例として図-2 に示した ^{60}Co についても、3つの規格化定数のうち1つは、記入されていない。こうした崩壊データから、応用分野で用いる放射線データ、即ち崩壊あたりの γ 線、 β 線等放射線の強度、を導出する場合、何らかの「ルール」に基づいて未記入の規格化定数を仮定せざるを得ない。ENSDF ファイルを維持している BNL/NNDC では、数種の ENSDF 処理用プログラムを提供しているが、このうち崩壊データから放射線データを導出するものとして MEDL I S T がある。本計算プログラムでは、未記入データを以下の様に仮定する；

NR (γ 線強度規格化定数)	: 1 を仮定
NT (γ 線転移 ($\gamma + c.e$) 規格化定数)	: NR と同一値
NB (β 線転移 (β 及び EC) 規格化定数)	: $1 / BR$
BR (分岐化)	: 1 を採用

表-1 に示した崩壊図式の吟味を行った際にも、上記「ルール」に従って、転移の強度を求めた。

本来、規格化定数が未記入の場合、崩壊データ評価者の側は、確定値が得られないと判断したものと解釈するのが自然である。しかしながら、応用分野側からみる

と、ENSDFの一部を構成する処理用プログラムに用いられた「ルール」に基づいた放射線データの導出値は、ENSDF「推奨値」と受け取るのも、また自然であろう。この食い違いが、表-1で示した10%以上の大きな不整合を生じた一因を成している。以下、 ^{185}Ir (EC-decay, $T_{1/2} = 14.0$ hr) を例にその極端なケースを示す。

この崩壊データの場合、Nカードでは、分岐比1.0を与えているのみで、他の3つの規格化定数は、全て未記入で、ECあるいは β^+ の転移強度は与えられていない。これに上記「ルール」を適用して、基底状態への γ 線転移の総和を求めると、1459%/崩壊となり、規格化定数を1にすることの無理は明らかである。この崩壊データのコメント・カードでは、規格化定数について以下の様に述べている。”規格化定数を基底状態へ転移する($\gamma + \text{c.e.}$)の強度を100%として求めると0.0697となる。-----崩壊図式が不完全であることから、ECフィードの導出は行わなかった”。即ち、この崩壊データでは、崩壊データ評価者の判断として、確定値として規格化定数を与えられなかったとしており、MEDLISTに用いられている「ルール」を特に意識していないと理解するのが妥当である。

(iv) Unplaced- γ

以上の議論では、全ての測定された γ 線(転移)が崩壊図式に組み込まれることを前提としたが、単純なものは別として、崩壊図式に組み込めなかった γ 転移(Unplaced- γ)が少なからず存在する。これらUnplaced- γ は、図-1に示した崩壊データのNカードと最初に現われるLカードの間に挿入され、これは(ii)で議論した崩壊図式の完全性を吟味する時には考慮していない。これらUnplaced- γ の存在は、崩壊図式の不完全さを示すものの一つであり、特に、この転移強度が他の γ 転移の強度に比較して大きい場合、崩壊図式に大きな変更をもたらすことも有り得る。

ところで、(ii)では崩壊図式の完全性という立場から、崩壊データを吟味したところであるが、もう一つの吟味の方法として、崩壊データより導出された放射線による放出エネルギー(β 転移については、夫々の転移の最大エネルギーをとる)の総和を、吟味対象とする崩壊のQ値と比較する方法が考えられる。ここで崩壊データから導出する放射線データの一部に上記のUnplaced- γ に係わる部分も合わせて考慮することとすれば、Unplaced- γ に伴って放出されるエネルギーの崩壊図式に組み込まれた転移のそれとの比較も可能となる。

この観点から、表-1の不整合の程度が1%以内に収まる、即ち崩壊図式の内的整合性が保たれていると考えられるもののうち数種類の崩壊データについて放射線データを導出し、崩壊あたりの放出エネルギーを求めた。この結果、大部分の崩壊データについては、算出値がQ値と矛盾しないものの一部のものについて著しい相異が認められた。これらの例のうち、 ^{155}Eu (β^- decay, $T_{1/2} = 4.68$ yr) の崩壊データから計算プログラムRADCALを用いて計算した結果を表-2に示す。ここでは、Unplaced- γ を除外して求めた結果についても合わせて示す。また表-3には、この崩壊データに含まれる Unplaced- γ のエネルギー及び強度を示す。なお、RADCALによる計算に於いては、 γ 線の内部転換係数、多重極度が共に与えられていない場合、多重極度E2を仮定($Z > 50$)し、これから内部転換電子の強度を算出している。

表-2に示される様に、Unplaced- γ を除外して求めた崩壊当りの放射線エネルギーについては、そのQ値との差が、2%程度で、おおむね評価誤差内と考えられるのに対し、Unplaced- γ を含めたものは、Q値の5倍程度と極端に大きな値を与える。この相異の内訳をみると、Unplaced- γ を考慮することにより、内部転換電子及び内殻電子の放出に伴うX線、オージェ電子に寄与する部分が増加する。これに対して γ 線エネルギーの直接の増加分は無視し得る。即ち γ 線の強度という観点から見る限り微弱で、崩壊図式の構成にさしたる影響を持たないと見られた γ 転移も、内部転換電子を含む全 γ 転移でみると、崩壊図式自体の検討をも迫る重要性なものとなり、詳細な検討を迫られる事態となることが理解される。これら Unplaced- γ の存在が事実かどうかを検討することも含めて、慎重な検討が必要となろう。

以上、ENSDFの問題点ということで、応用分野の側から、このデータ・ファイルの使用に係わる困難について記述した。ここで述べたように、ENSDFを直接に使用しようとする際、いまだ注意を要する点がかなり見受けられる。放射線データ導出計算プログラムRADCALでは、これらの問題点についてチェックを行うサポート・プログラムを付加することで、不合理な放射線データの算出をさけるものとしている。今後の測定データの蓄積及び評価活動の進展で、これら問題点が解決され、応用分野において、直接の使用が可能なデータ・ファイルとしてENSDFが整備されていくことを期待する。

$5+ \quad 5.2704 \text{ Y}$
 $^{60}\text{Co} \quad \beta\text{-decay} \quad 100.00 \text{ I}$
 $Q_0 = 2823.6$

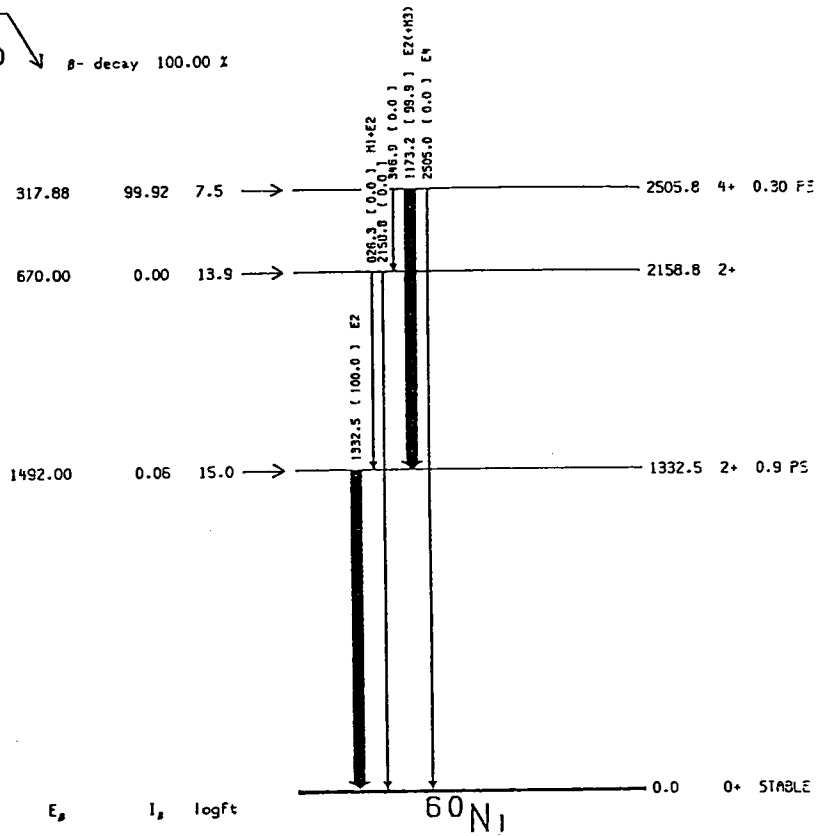


図-1 ^{60}Co 崩壊図式

60NI	60CO B- DECAY (5.2704 Y)	76CA18,68HA03	86NDS	860805
60NI	N 1.0	1.0		
60CO	P 0.0	5.2704 Y 13	2823.64	11
60NI	L 0	STABLE		
60NI	L 1332.517 5 2+	0.9 PS 3		
60NI	B 1492 20 0.057 20	15.0316		2U
60NI2	B EAV= 625.88 5			
60NI	G 1332.501 5 99.9820 10 E2		1.33E-4 499.9989	2 B
60NI	L 2158.82 5 2+			
60NI	B 670 20 0.0022 LT	13.9 GT		2U
60NI2	B EAV= 274.95 5			
60NI	G 826.28 9 0.0076 8 M1+E2	+0.81 17		
60NI	G 2158.77 90.00111 18			
60NI	L 2505.766 7 4+	0.30 PS 9		
60NI	B 317.88 10 99.925 20	7.510 1		D
60NI2	B EAV= 95.78 4			
60NI	G 346.93 7 0.0076 5			
60NI	G 1173.237 4 99.90 2 E2(+M3)	-0.0025 22	1.77E-4 5	A
60NI	G 2505 2.0E-6 4 E4			C

図-2 ^{60}Co β^- 崩壊に対する ENSDF 崩壊データ

表-1 崩壊図式の完全性で分類した ENSDF 崩壊データの分布

Degree of discrepancies	Number of decay data sets					
	Transition from parent nuclide			For the transition to G.S. or M.S.		
	Total	Half life		Total	Half life	
		< 10 min.	> 10 min.		< 10 min.	> 10 min.
. 1 %	1593	755	838	1508	708	800
1~5 %	283	136	147	207	94	113
5~10%	87	45	42	81	43	38
10~ %	215	143	72	342	282	160
No transition given	376	316	60	316	268	48
Total	2554	1395	1159	2554	1395	1159

表-2 ^{155}Eu の崩壊に伴って放出される放射線エネルギー

	Radiation energy emission/decay	
	Unplaced・included	not included
beta	4.61 x 10 keV (1.71 x 10 ²)	4.61 x 10 keV (1.71 x 10 ²)
gamma	5.31 x 10	5.31 x 10
c.e.	4.77 x 10 ²	1.69 x 10
X-ray	1.04 x 10 ²	1.14 x 10
Auger el.	6.10 x 10 ²	4.83
Total	1.29 x 10 ³ (1.42 x 10 ³)	1.32 x 10 ² (2.57 x 10 ²)

Q-value ; 2.527 x 10² keV

() 内は、平均エネルギーに代えて最大エネルギーを用いて求めた β 線放出エネルギー

表-3 ^{155}Eu 崩壊データに含まれる Unplaced・ γ リスト

$E_{\gamma}(\text{keV})$	$I_{\gamma}(\%/decay)$
10.40	3.87 x 10 ⁻⁴
12.7	1.05 x 10 ⁻³
13.8	2.10 x 10 ⁻³
24.56	8.20 x 10 ⁻⁴
40.75	2.82 x 10 ⁻³
107.6	4.26 x 10 ⁻⁴

(内部転換係数、多重極度に係わるデータについては記入なし)