

荷電粒子放射化分析に係わる核種データベース整備

研究開発室 大島 真澄
村松 航*
天野 光
山口 友理恵
伴場 滋
森本 隆夫

1. はじめに

茨城県東海村にあるいばらき中性子医療研究センター（Ibaraki Neutron Medical Research Center, INMRC）では、最先端のがん治療法である加速器を用いたホウ素中性子捕捉療法（Boron Neutron Capture Therapy, BNCT）の実用化を推進するため、小型陽子線加速器施設の整備が進められている。この施設では、大強度中性子線と陽子線の両方を利用することができ、前者は BNCT におけるがん患者への照射に用いられ、一方後者は荷電粒子放射化分析（Charged Particle Activation Analysis, CPAA）による一般元素分析や BNCT の中性子照射時間管理のための血液中 ^{10}B 濃度の迅速分析等に利用することが可能である。

放射化分析による一般元素分析には、迅速、非破壊、高確度、多元素同時定量といった特徴がある。放射化分析のうち、主流である中性子放射化分析は、三浦(2012)により報告されているように、一次標準測定法の能力・条件を満たす確度の高い分析法と認められている。CPAA は同等の特徴を有するが、これまでは中性子放射化分析法の補完的手段として軽元素分析に重点が置かれてきた。K. Masumoto et al.(1997)による報告では、Li,B,N などの軽元素において、化学処理と併用して、サブ ppb レベルの高感度分析の実績がある。しかし、原子炉など大型中性子源施設の減少に伴い、小型加速器利用で汎用性の高い CPAA が見直されるようになった。そこで本研究では、CPAA の軽元素から重元素まで全安定元素への適用性を検討するために、全安定核種に対する CPAA による生成核種の原子核データベースを作成し、その適用例として BNCT における血液中ホウ素分析評価を行ったので、その結果を報告する。

*現所属：原電事業株式会社

2. 原子核データベースの作成

2.1 核反応断面積

同位体存在比 1%以上の原子番号 1 から 92 の安定核種を主な対象として、INMRC で利用可能な 8MeV 陽子線を照射した場合の生成核種および核反応断面積を、米国 National Nuclear Data Center (以下「NNDC」と呼ぶ) が提供している原子核反応データベース EXFOR を参照してまとめた。NNDC は過去の実験や文献に関する履歴情報に加え、核構造や崩壊、反応データのような核科学に関するデータのレポジトリとして機能する組織であり、EXFOR は全世界において過去に得られた主要な原子核反応データを網羅し、それらを検索・表示することができる。

検索条件として、Target を各標的核種、Reaction を(p,*), Quantity をCS (反応断面積)、Energy を 5MeV~30MeV とした。これにより、陽子エネルギーに対する反応断面積の数値データと Fig. 1 の例に示すプロットが得られる。この図から 8 MeV での主要な核反応、生成核種及びその反応断面積を読み取る。ほとんどは(p,n)反応断面積であるが、¹⁰B 核種については(p,α)断面積、^{106,108}Cd, ¹¹²Sn, ¹⁴²Ce については(p,γ)断面積、¹⁴²Nd については(p,d)断面積、¹⁷⁸Hf については(p,2n)断面積、¹⁹²Os については(p,t)断面積の値が大きく、これらについても含めた。反応の種別については直接記載しないが、娘核種から推定できる。放射化分析で最も一般的な中性子放射化分析では中性子捕獲反応が用いられるので、比較のために(n,γ)断面積についても検索し、Table 1 にまとめた。また、Fig. 2 に(p,*)断面積と(n,γ)断面積の比較を示す。

Fig. 2 より (p,*)断面積には以下の特徴があることがわかる。

・原子核のクーロン反発力により、中重核以上では(p,*)断面積は減少するが、減少の割合は大きくはなく、重核領域においても 1 mb 以上の断面積がある。一方、(n,γ)断面積は

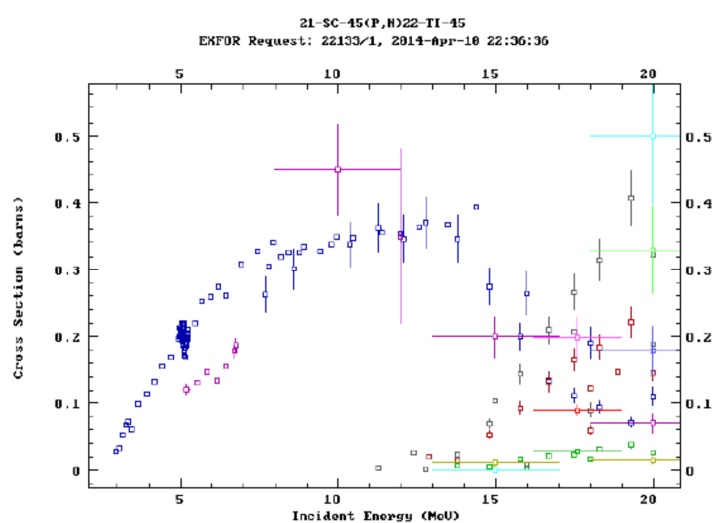


Fig. 1 An example of (p,*) cross section plotted by EXFOR (A detailed explanation of data points is not shown here. See Ref. 1 for more details.)

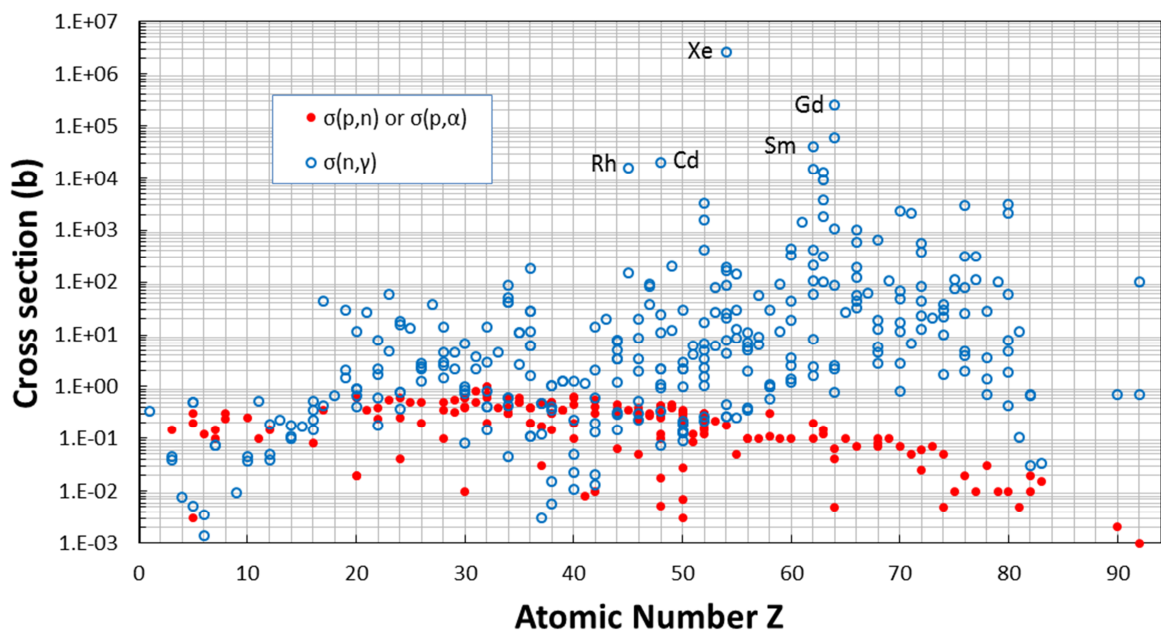


Fig. 2 Comparison of (p,*) and (n, γ) cross sections

Zとともに増大し、(p,*) 断面積より 1 - 6 桁大きい。

- (p,*) 断面積は、(n, γ) 断面積に比べて、元素ごとのばらつきが小さい。
- Tl, (Hg, Pb), Th, U など重元素も一定感度で定量可能。
- しかしながら、Z = 1(H), 2(He), 14(Si), 15(P), 18(Ar), 19(K)では、断面積データが報告されていないか小さいため、定量は困難と予想される。

2.2 崩壊データ

各標的核種に対しての 8MeV 陽子線照射による生成核種のうち、半減期が 10 秒以上かつ 1 年未満の核種について、崩壊データを調べた。NNDC が開発したプログラム NuDat 2 は、過去の核構造と崩壊データを網羅した評価済み核構造データファイル(Evaluated Nuclear Structure Data File)を検索し、表示する。これを用いて、(p,*)反応による生成核種の崩壊様式の種類 (β^+ / β^- /EC/IT) と分岐比、X 線エネルギー、半減期、強い方から 3 本のシングルガンマ線のエネルギーと強度、またもっとも強い同時発生 (カスケード) ガンマ線のエネルギーと強度を、EXCEL の表にデータベース化した。

生成核種が核異性体の場合は、一般表記に従い、最後に”M”を付した。半減期については、値と単位を入れ、単位の年、日、時間、分、秒を各々、y, d, h, m, s で表した。一般に放射性核種の崩壊モードには、 β^+ 、 β^- 、電子捕獲、核異性体転移があり、これらが共存することがあり得るが、それらのうち分岐比の大きい崩壊モードを、それぞれ b+, b-, EC, IT

と表記し、その分岐比 (%) を入れた。EC 崩壊が主の場合には、X 線放出を伴うので、最も強い K_{α} X 線のエネルギー値をデータベースに含めた。 β^+ 崩壊の場合には 511 keV 消滅ガンマ線が伴うが、その強度は、 β^+ 分岐比の 2 倍として計算できるので、ガンマ線データには含めない。ガンマ線データは 1 崩壊当たりの強度の順番で 3 本のガンマ線について、エネルギーは keV 単位で、強度は 1 崩壊当たりの % で表した。同時発生ガンマ線は最強と思われるペアについて、それらのエネルギーと 1 崩壊あたりの強度を含めた。

2.2.1 半減期

Fig. 3 に CPAA で生成された全核種の半減期を核種の原子番号の関数として示す。一般に放射化分析では、生成量が同じであれば、半減期に依らず全崩壊数は同じになるが、半減期が試料搬送時間より短い場合や、数日を超す長半減期の場合には、合理的な測定時間の範囲内で十分な統計が得られず、定量感が悪くなる。よって、試料搬送時間 10 秒程度を想定すると、1 分から 1 週間 (~ 10,000 min) の半減期を有する核種の感度が高い。Fig. 3 に示すように、ほとんどの中重核ではこの条件を満たすが、軽核、特に $Z = 1, 2, 9-13, 15, 18, 19, 27$ での感度不足が予想される。

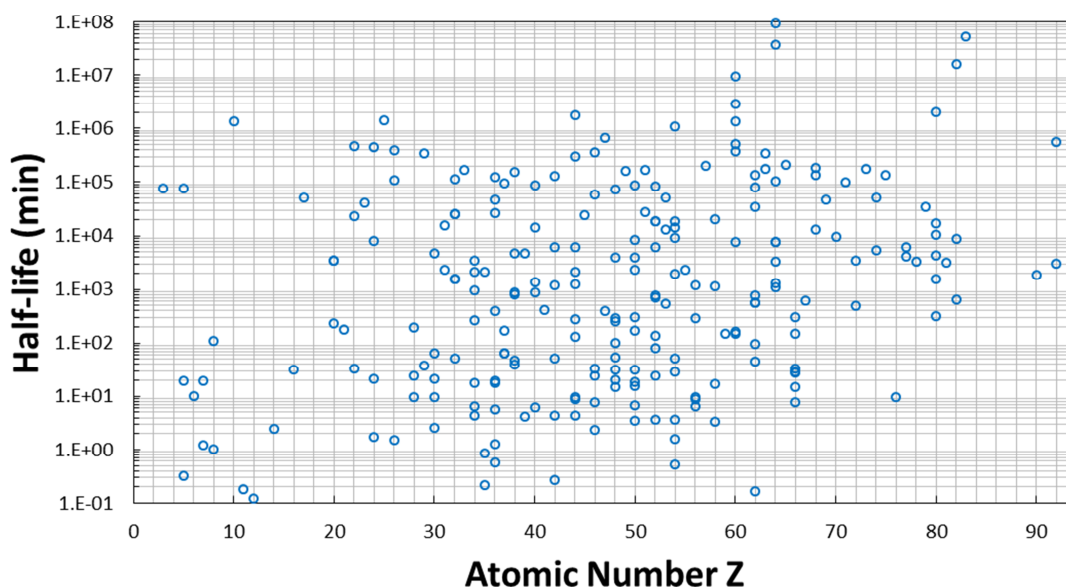


Fig. 3 Half-life of product nuclei

2.2.2 崩壊モード

Fig. 4 に CPAA で生成された全核種の崩壊モードと分岐比を原子番号の関数として示す。 $Z < 20$ の軽核では β^+ 崩壊が主である。 β^+ 崩壊の場合には 2 本の 511 keV 消滅ガンマ線を伴う。それ以上では EC 崩壊が主になる。上記したように、EC 崩壊の場合には、特性 X 線放

出を伴うので、最も強い K_{α} X 線のエネルギー値をデータベースに含めた。 β^{-} 崩壊は $Z>30$ で現れ、頻度は EC 崩壊より少ない。IT 崩壊はそれ以上に領域が限られる。

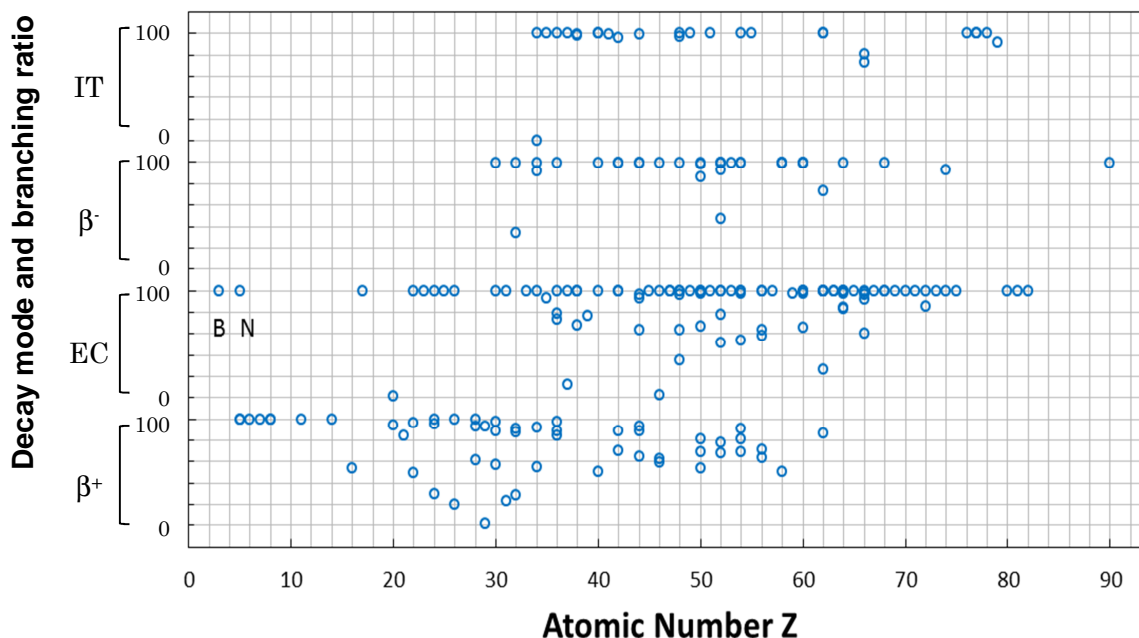


Fig. 4 Decay mode of product nuclei

2.2.3 シングルガンマ線強度

Fig. 5 に CPAA で生成された全核種が放出する 1 崩壊あたりのシングルガンマ線放出割合 (%) を、原子番号の関数として示す。 $Z<20$ の軽核では、 $Z=5,7$ を除き、ガンマ線放出割合は小さい。しかしながら、前項で述べたように、軽核では消滅ガンマ線 (511 keV) を発生する β^{+} 崩壊が主であることから、一般的に軽元素では、化学分離を行い、元素を特定した後に、消滅ガンマ線を測定して定量することが望ましい。これに対して $Z\geq 20$ の中重元素ではガンマ線測定のみで核種同定ができ、所謂非破壊分析が可能である。

2.2.4 同時発生 (カスケード) ガンマ線放出割合

Fig. 6 に CPAA で生成された全核種の崩壊により発生する同時発生ガンマ線放出割合を、原子番号の関数として示す。同時発生ガンマ線を複数のガンマ線検出器を用いて同時計数測定を行うと、分解能および定量感度改善に効果があることが知られている。同時発生ガンマ線放出割合はこの手法が可能な核種を示す。適用核種の分布はシングルガンマ線放出割合に近いが、全体に少なくなり、 $Z<20$ では適用核種はないことがわかる。中重核領域において適用性が期待される。

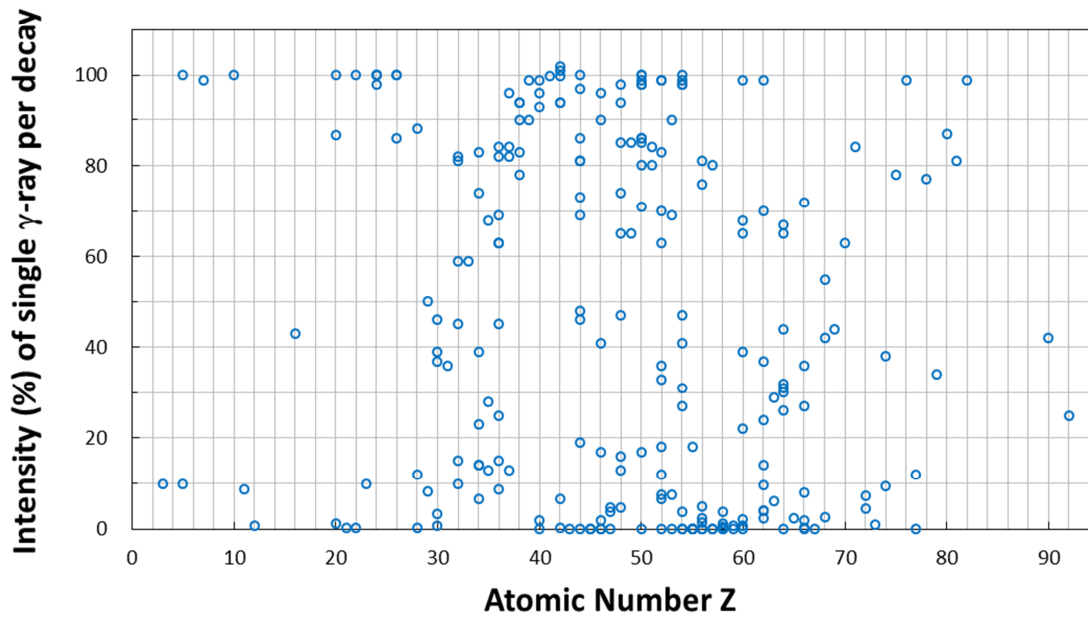


Fig. 5 Intensity(%) of single γ -rays of product nuclei

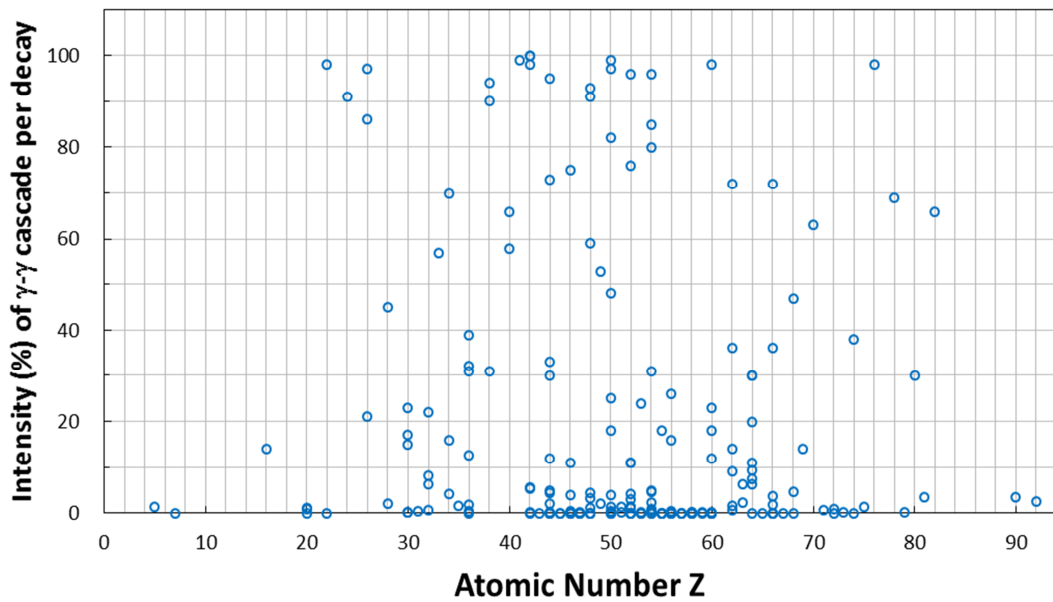


Fig. 6 Intensity(%) of γ - γ cascade of product nuclei

2.3 データベース整備のまとめ

Z=1 から 92 までの安定核種について、存在率、(p,*)反応断面積、(n,γ)反応断面積、反応生成核種とその半減期、崩壊モードと分岐比、X 線エネルギー、強い方から 3 本のシングルガンマ線エネルギーと強度、最強の同時発生ガンマ線ペアのエネルギーと強度の原子核データを、核種毎・崩壊モード毎に 1 行に凝縮して、Table 1 に示す EXCEL 表にまとめた。データベース中において、NNDC からデータが得られなかった箇所や、放出ガンマ線が 2 本までしかない等の該当データがない箇所には "-" で、標的核種の同位体存在比が小さい場合や、生成核種が極端に短寿命または長寿命で測定に適さない場合などの理由により未調査の箇所は空欄で示している。このデータベース開発の主目的は元素毎の定量感度評価であり、CPAA の定量分析に直接用いることは想定していないため（定量には直接法ではなく、比較法を用いる）、定量の誤差評価に必要な核物理量（断面積、半減期、ガンマ線強度…）の誤差は含めていない。

データベースは実用性を重視しており、必ずしも完全なものではない。つまり、核種によっては複数の崩壊モードがあり、定量に使えると判断されるものについては、全部含めた場合もあるが、半減期が長く比放射能が小さい、分岐比が小さいなど定量に不利と判断されるものについては、省略したケースもある。ガンマ線データについても同様である。しかしながら、これらの基準は絶対的なものではないので、将来必要に応じて見直し、補完されていく可能性がある。このために、拡張性を考慮したデータ構造とした。

3. データベースの応用例

整備した核種データベースは様々な応用が可能であるが、以下にその一例として、BNCT がん治療における血液試料分析への応用例を紹介する。血液中のホウ素-10 (^{10}B) 濃度は、同がん治療において、中性子照射線量（照射時間）を決める重要な因子であるため、患者ごとに正確な測定が必要とされている。よって、陽子放射化分析を適用した場合の照射と測定の最適条件を、核種データベースを用いて以下により評価した。

血液試料に対して、8MeV, 1μA の陽子ビームを照射し、一定時間冷却した場合の核種の放射能強度を計算するために、以下の式を用いる。

$$C = \sigma \varphi \frac{wa}{M} N_a \{1 - \exp(-\lambda t_i)\} \exp(-\lambda t_1) \quad (1)$$

ここで、 σ は 反応断面積、 φ は ビーム強度、 w は物質質量、 a は同位体存在比、 M は atomic mass number、 N_a は アボガドロ数、 λ は核寿命（半減期の 0.693⁻¹倍）の逆数、 t_i は 照射時間、 t_1 は照射後ガンマ線測定を開始するまでの時間である。

血液試料には、主要元素として含有量が多い順に H(60.3%), O(25.5%), C(10.5%), N(2.4%), Na(0.7%), Ca(0.2%), P(0.1%), S(0.1%), K(0.04%), Cl(0.03%)などの元素が含まれる。これに、BNCT がん治療用にホウ素 (^{10}B) 10 ppm を添加した試料を仮定した。血液

試料は石英フィルターに含浸後、蒸発乾固してターゲットとすることを想定して、90%の石英 (SiO_2) と 10%血液の濃度比を仮定した。ターゲット量は陽子エネルギー8 MeV の飛程 0.042 mg/cm^2 より求めた。

照射時間は30分とした。照射終了後測定開始までの時間の関数として、核種ごとの放射能強度(Bq)の結果を Fig. 7 に示す。これは以上の元素分布のみを入力して得られたものである。

Fig. 7 より、11種の放射性核種が生成されることがわかった。放射能強度は各々の半減期に従い、減衰していく。 ${}^7\text{Be}$, ${}^{18}\text{F}$, ${}^{37}\text{Ar}$, ${}^{44}\text{Sc}$, ${}^{44\text{m}}\text{Sc}$ 以外は比較的短寿命であり、照射後500分後には decay out する。目的とする ${}^{10}\text{B}$ に起因する ${}^7\text{Be}$ ((p,α) 反応で生成される) は長寿命 ($T_{1/2}=53\text{d}$) であるため、ほぼ2000分程度以上冷却してから測定することが望ましいことがわかった。最も強度が高いのは ${}^{18}\text{O}$ に起因する ${}^{18}\text{F}$ である。 ${}^{18}\text{O}$ はもともと血液に含まれているが、母材である石英フィルターにより多く含まれるため、母材を代えることで、 ${}^{18}\text{F}$ 成分を減らすことができる。これに対し、Si から生成される ${}^{30}\text{P}$ は短寿命であるため、 ${}^7\text{Be}$ の測定には影響しないなどの知見が得られた。

以上は一例であるが、ターゲット・測定条件を評価するために、核種データベースは有効である。また、本データベースにはガンマ線データも含まれているので、ガンマ線スペクトルのピークカウントの計算により定量感度の評価等にも使うことができる。

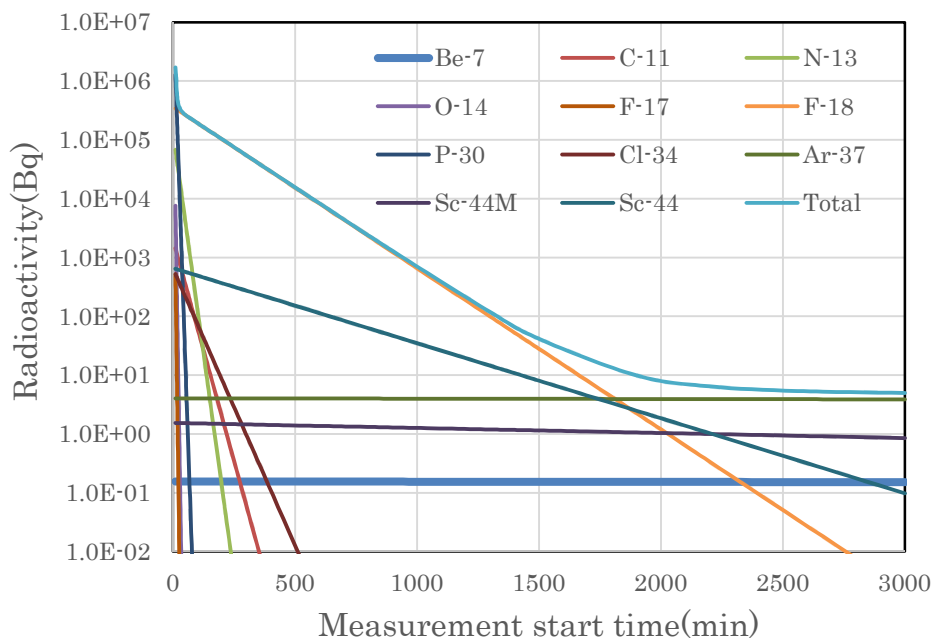


Fig. 7 Radioactivity of nuclei produced by proton irradiation on a blood sample

4. 結果と考察

今回、公開核データライブラリから核種データベースを EXCEL 表として整備した。対象とした物理量は、核種存在比、陽子誘起反応断面積、中性子捕獲断面積、生成核種の半減期、崩壊モード、X線エネルギー、シングルガンマ線のエネルギーと強度、同時発生ガンマ線のエネルギーと放出割合などであり、それらの主なものについて、以下にその特徴をまとめた。

- * 荷電粒子反応において、一般的には、クーロンバリアのため、中重元素では断面積が小さくなるので放射化分析には向かないとされてきた。実際に、主に軽元素の分析が行われてきたが、今回実験データを基にした原子核データベース EXFOR を検証することで、重核で断面積は下がる傾向にあるものの、ほぼ全領域の核種において、有限の感度があることが分かった。これは原子核のトンネル効果によるものである。
- * 半減期は 1 分から 1 週間 (~ 10,000 min) 程度の半減期を有する核種の感度が高いと予想され、ほとんどの中重核ではこの条件を満たす。しかし、軽核、特に $Z = 1, 2, 9-13, 15, 18, 19, 27$ での感度が低いことが予想される。
- * $Z < 20$ の軽核では、 $Z = 5, 7$ を除き、ガンマ線放出割合は小さい。一方、軽核では消滅ガンマ線 (511 keV) を発生する β^+ 崩壊が主であることから、軽元素を分析するためには、化学分離を行い、元素を特定した後に、消滅ガンマ線を測定する方法が有利である。これに対して $Z \geq 20$ の中重元素ではガンマ線測定のみで核種同定ができ、所謂非破壊分析が可能である。
- * 同時発生ガンマ線を複数のガンマ線検出器で同時計数測定を行うと、分解能及び定量感度を改善できることが知られている。同時発生ガンマ線を発生する核種の分布はシングルガンマ線放出割合に近いが、全体に少なくなり、 $Z < 20$ では適用核種は少ないことがわかる。よって、この方法は中重核領域において適用が期待される。

開発したデータベースの応用例として、BNCT がん治療のための血液中ホウ素濃度分析の評価結果を紹介した。EXCEL 上で、簡単に陽子放射化分析の生成核種と時間分布を計算することができ、有用なデータベースであることが確認できた。

開発したデータベースは以上の例以外にも様々な利用が可能である。例えば、照射・測定条件を変えて核種毎のガンマ線強度を計算することにより、定量条件の最適化と元素ごとの定量感度評価に用いることができる。また、複合試料において多元素が含まれる場合での各元素の定量感度評価や、一定条件での核種生成量から、RI 許可申請書作成のための基礎データとしても活用される。

参考文献

三浦勉：“標準物質開発に有効な中性子放射化分析”，*ぶんせき*, 488-494, 2012.

K. Masumoto, M. Hara, D. Hasegawa, E. Iino, and M. Yagi, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 217 (1997) 247-253.

Table 1 Nuclide data base for charged particle activation analysis (2)

対象核種			存在比	反応断面積		娘核種	半減期		崩壊様式		X線エネルギー	シングルガンマ線エネルギー・強度						カスケードガンマ線エネルギー・強度		
Z		A	Abundance	$\sigma(n,\gamma)$	$\sigma(p,*)$	Daughter nucleus	T _{1/2}	unit	Decay mode	I(b+/b-/EC/IT)	EK α	E γ 1	I γ 1	E γ 2	I γ 2	E γ 3	I γ 3	E γ (1)	E γ (2)	I γ (12)
			%	b	b				b+/b-/EC/IT	%	keV	keV	%	keV	%	keV	%	keV	keV	%
16	S	32	95	0.5282		Cl-32														
16	S	33	0.76	0.35		Cl-33														
16	S	34	4	0.2236	0.08	Cl-34	32	m	b+	54		2127	43	1177	14	3304	12	1177	2128	14
16	S	36	0.02	0.15		Cl-36														
17	Cl	35	76	43.6		Ar-35														
17	Cl	37	24	0.4329	0.35	Ar-37	35	d	EC	100	2.8									
18	Ar	40	100	0.66		K40														
19	K	39	93	2.098		Ca-39														
19	K	40	0.0117	30		Ca-40														
19	K	41	7	1.459		Ca-41														
20	Ca	40	97	0.4075		Sc-40														
20	Ca	42	0.65	0.683		Sc-42														
20	Ca	43	0.14	11.66		Sc-43														
20	Ca	44	2	0.8884	0.02	Sc-44M	2.44	d	IT	98.8		271	86.7	-	-	-	-	-	-	-
20	Ca	44	2	0.8884	0.02	Sc-44M	2.44	d	EC	1.2	3.7	1002	1.2	1126	1.2	1157	1.2	1002	1126	1.2
20	Ca	44	2	0.8884	0.6	Sc-44	3.93	h	b+	94		1157	100	1500	0.9			1157	1500	0.9
21	Sc	45	100	27.14	0.35	Ti-45	3	h	b+	85		720	0.15					-	-	
22	Ti	46	8	0.596		V-46														
22	Ti	47	7	1.702	0.24	V-47	33	m	b+	97		1794	0.19	160	0.11			244	1390	0.051
22	Ti	48	73	7.844	0.4	V-48	16	d	b+	50		984	100	1312	98	2240	2.3	984	1312	98
22	Ti	49	5	2.214	-	V-49	330	d	EC	100	4.5	-								
22	Ti	50	5	0.1786		V-50														
23	V	50	0.25	60		Cr-50														
23	V	51	100	4.903	0.55	Cr-51	28	d	EC	100	5	320	10					-	-	
24	Cr	50	4	15.92	0	Mn-50	1.75	m	b+	100		783	100	1098	99					
24	Cr	52	84	0.764	0.04	Mn-52	5.6	d	b+	30		1434	100	936	95	744	90	744	935	91
24	Cr	52	84	0.764	0.25	Mn-52M	21.1	m	b+	95		1434	98	378	1.7			-	-	
24	Cr	53	10	18.21		Mn-53														
24	Cr	54	2	0.3644	0.6	Mn-54	312	d	EC	100	5.4	835	100					-	-	
25	Mn	55	100	13.41	0.5	Fe-55	2.74	y	EC	100	5.9	-						-	-	

Table 1 Nuclide data base for charged particle activation analysis (3)

対象核種			存在比	反応断面積		娘核種	半減期		崩壊様式		X線エ ネルギー	シングルガンマ線エネルギー・強度						カスケードガンマ線 エネルギー・強度		
Z		A	Abundanc e	$\sigma(n,\gamma)$	$\sigma(p,^*)$	Daughter nucleus	T _{1/2}	unit	Decay mode	I(b+/b-/ EC/IT)	EK α	E γ 1	I γ 1	E γ 2	I γ 2	E γ 3	I γ 3	E γ (1)	E γ (2)	I γ (12)
			%	b	b				b+/b-/ EC/IT	%	keV	keV	%	keV	%	keV	%	keV	keV	%
26	Fe	54	6	2.156	-	Co-54	1.48	m	b+	100		1407	100	1130	98	411	97	411	1130	97
26	Fe	56	92	2.813	0.2	Co-56	77	d	b+	19.7		847	100	1238	66	1037	14	847	1238	21
26	Fe	57	2	2.462	0.5	Co-57	272	d	EC	100	6.4	122	86	136	11	14	9	122	14	86
26	Fe	58	0.28	1.3		Co-58														
27	Co	59	100	37.18	-	Ni-59	76000	y												
28	Ni	58	68	4.503		Cu-58														
28	Ni	60	26	2.9	0.1	Cu-60	24	m	b+	93		1332	88	1792	45	826	22	1332	1792	45
28	Ni	61	1	2.509	0.35	Cu-61	3.3	h	b+	62		283	12	656	11	1185	3.7	373	283	2.1
28	Ni	62	4	14.2	0.5	Cu-62	9.7	m	b+	98		1173	0.34							
28	Ni	64	0.9	1.48		Cu-64														
29	Cu	63	69	4.506	0.32	Zn-63	38	m	b+	93		670	8.2	962	6.5					
29	Cu	65	31	2.168	0.55	Zn-65	244	d	b+	1.4		1116	50							
30	Zn	64	49	0.76	0.01	Ga-64	2.6	m	b+	98		992	46	808	15	3366	14	808	992	15
30	Zn	66	28	0.85	0.4	Ga-66	9.5	m	b+	57		1039	37	2752	23	834	5.9	1039	2752	23
30	Zn	67	4	6.8	0.42	Ga-67	3.3	d	EC	100	8.6	93	39	185	21	300	17	300	93	17
30	Zn	68	19	1	0.6	Ga-68	1.1	h	b+	89		1077	3.2	1883	0.14	806	0.09	806	1077	0.094
30	Zn	70	0.6	0.083	0.6	Ga-70	21.1	m	b-	99.6		1039	0.65	176	0.29			176	1039	0.29
31	Ga	69	60	2.2	0.5	Ge-69	1.6	d	b+	24		1107	36	574	13	874	12	235	872	0.35
31	Ga	71	40	3.709	0.8	Ge-71	11	d	EC	100	9.25	-								
32	Ge	70	21	2.935	0.2	As-70	53	m	b+	91		1039	82	668	22	744	22	668	1039	22
32	Ge	72	28	0.81	0.6	As-72	1.1	d	b+	88		834	81	630	8.1	1050	1	630	834	8.1
32	Ge	73	8	14.4	-	As-73	80	d	EC	100	9.9	53	10	13	0.084					
32	Ge	74	36	0.42	1	As-74	17.8	d	b+	29		596	59	608	0.55	1204	0.29	608	596	0.55
32	Ge	74	36	0.42	1	As-74	17.8	d	b-	34		635	15	-						
32	Ge	76	7	0.15	0.7	As-76	1.1	d	b-	100		559	45	657	6.2	1216	3.4	657	559	6.2
33	As	75	100	4.5	0.4	Se-75	120	d	EC	100	10.5	265	59	136	58	121	17	136	265	57
34	Se	74	0.89	51.8	-															
34	Se	76	9	85	0.3	Br-76	16	h	b+	55		559	74	657	16	1854	15	559	657	16
34	Se	77	8	42	0.4	Br-77	4.28	m	IT			106	14							
34	Se	77	8	42	0.4	Br-77	2.4	d	EC	100	11.2	239	23	521	22	297	4.2	297	521	4.1

Table 1 Nuclide data base for charged particle activation analysis (6)

対象核種			存在比	反応断面積		娘核種	半減期		崩壊様式		X線エネルギー	シングルガンマ線エネルギー・強度						カスケードガンマ線エネルギー・強度		
Z		A	Abundance	$\sigma(n,\gamma)$	$\sigma(p,*)$	Daughter nucleus	T _{1/2}	unit	Decay mode	I(b+/b-/EC/IT)	EK α	E γ 1	I γ 1	E γ 2	I γ 2	E γ 3	I γ 3	E γ (1)	E γ (2)	I γ (12)
			%	b	b				b+/b-/EC/IT	%	keV	keV	%	keV	%	keV	%	keV	keV	%
46	Pd	108	26	8.5	0.34	Ag-108	2.4	m	b-	97	21.18	633	1.8	434	0.5	619	0.26	434	619	0.26
46	Pd	110	12	0.227	0.05	Ag-110M	250	d	b-	98.7	-	658	96	885	75	937	35	658	885	75
47	Ag	107	52	38.62	0.3	Cd-107	6.5	h	EC	99.8	22.16	93	4.7	829	0.16	796	0.065	829	93	0.16
47	Ag	109	48	90.54	0.28	Cd-109	461	d	EC	100	22.16	88	3.7	-	-	-	-	-	-	-
47	Ag	110		82	-	Cd-110	stable		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	Cd	106	1.3	0.9695	5.2E-03	In-107	32	m	b+	36	23.17	205	47	506	12	321	10	205	728	3.3
48	Cd	108	0.89	1.087	0.018	In-109	4.2	h	b+	4.6	23.17	203	74	624	5.5	1149	4.3	204	1149	4.3
48	Cd	110	13	11.05	0.25	In-110	4.9	h	EC	99.9	23.17	658	98	885	93	937	68	658	885	93
48	Cd	111	13	23.94	0.3	In-111	2.8	d	EC	100	23.17	245	94	171	91	-	-	245	171	91
48	Cd	112	24	2.192	0.44	In-112M	21	m	IT	100		156	13	-	-	-	-	-	-	-
48	Cd	112	24	2.192	0.44	In-112	15	m	b+	21	23.17	617	4.6	606	1.1	1253	0.22	617	606	1.1
48	Cd	113	12	20650	0.12	In-113M	99	m	IT	100	-	392	65	-	-	-	-	-	-	-
48	Cd	114	29	0.3404	0.28	In-114M	50	d	IT	97	-	190	16	-	-	-	-	-	-	-
48	Cd	116	7	0.07484	0.1	In-116M	54	m	b-	100	-	1294	85	1097	59	417	27	1294	1097	59
49	In	113	4	12.07	0.45	Sn-113	115	d	EC	100	24.21	392	65	255	2.1	638	0.00097	392	255	2.1
49	In	115	96	201	0.4	Sn-115M	1.6E-04	s	IT	100	-	498	85	116	53	101	15	498	116	53
50	Sn	112	0.97	1.009	0.028	Sb-113	6.7	m	b+	69	-	498	80	332	15	88	2.7	332	1147	0.45
50	Sn	114	0.66	0.1253	-	Sb-114	3.5	m	b+	81	-	1300	99	888	18	327	7.2	1300	888	18
50	Sn	115	0.34	29.85	0.25	Sb-115	32	m	b+	35	25.27	497	98	489	1.3	1237	0.58	497	489	1.3
50	Sn	116	15	0.1277	0.19	Sb-116	16	m	b+	54	-	1294	85	932	25	2225	15	1294	932	25
50	Sn	117	8	2.173	0.3	Sb-117	2.8	h	EC	98	25.27	159	86	861	0.31	1005	0.21	159	861	0.31
50	Sn	118	24	0.2178	0.003	Sb-118M	5	h	EC	99	25.27	1230	100	254	99	1051	97	1230	1051	97
50	Sn	119	9	2.176	0.3	Sb-119	38	h	EC	100	25.27	24	17	-	-	-	-	-	-	-
50	Sn	120	33	0.1392	0.007	Sb-120M	5.8	d	EC	100	25.27	1172	100	1023	99	197	87	1172	1023	99
50	Sn	122	5	0.1837	0.35	Sb-122	2.7	d	b-	98	-	564	71	693	3.9	1257	0.81	564	693	3.9
50	Sn	123		3	-	Sb-123	stable		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	Sn	124	6	0.1355	0.34	Sb-124	60	d	b-	100	-	603	98	1691	48	723	11	603	1691	48
50	Sn	126		0.09	-	Sb-126M	19	m	b-	86	-	666	86	415	86	695	82	666	695	82
51	Sb	121	57	5.991	0.085	Te-121	19.2	d	EC	100	26.36	573	80	508	18	470	1.4	470	37	1.4
51	Sb	123	43	4.187	0.12	Te-123M	119	d	IT	100	-	159	84	88	0.092	248	0.00034	88	159	0.092

Table 1 Nuclide data base for charged particle activation analysis (8)

対象核種			存在比	反応断面積		娘核種	半減期		崩壊様式		X線エネルギー	シングルガンマ線エネルギー・強度						カスケードガンマ線エネルギー・強度		
Z		A	Abundance	$\sigma(n,\gamma)$	$\sigma(p,*)$	Daughter nucleus	T _{1/2}	unit	Decay mode	I(b+/b-/EC/IT)	EK α	E γ 1	I γ 1	E γ 2	I γ 2	E γ 3	I γ 3	E γ (1)	E γ (2)	I γ (12)
			%	b	b				b+/b-/EC/IT	%	keV	keV	%	keV	%	keV	%	keV	keV	%
55	Cs	136		13	-	Ba-136	stable		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	Cs	137		0.25	-	Ba-137	stable		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56	Ba	130	0.11	11.29	-	La-130	8.7	m	b+	71	-	357	81	551	26	908	17	357	551	26
56	Ba	132	0.1	7	0.1	La-132	4.8	h	b+	42	32.19	465	76	567	16	663	9	465	567	16
56	Ba	134	2	2.002	-	La-134	6.5	m	b+	64	-	605	5	1555	0.41	563	0.36	605	1555	0.41
56	Ba	135	7	5.796	0.1	La-135	20	h	EC	99.9	32.19	481	1.5	875	0.16	588	0.11	221	367	0.032
56	Ba	136	8	0.4001	-	La-136	9.9	m	b+	36	32.19	819	2.3	761	0.29	1323	0.27	819	761	0.29
56	Ba	137	11	5.122	-	La-137	6.0E+04	y	EC	100	32.19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56	Ba	138	72	0.3591	-	La-138	stable		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57	La	138	0.089	57.08	-	Ce-138	stable		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57	La	139	99.9	8.93	0.1	Ce-139	138	d	EC	100	33.44	166	80	-	-	-	-	-	-	-
57	La	140		6.3	-	Ce-140	stable		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	Ce	140	89	1.1	0.3	Pr-140	3.4	m	b+	51	-	1596	0.49	307	0.15	752	0.031	1596	307	0.15
58	Ce	141		0.5697	-	Pr-141	stable		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	Ce	142	11	29.12	0.11	Pr-142	19	h	b-	99.9	-	1575	3.7	509	0.023	-	-	1575	509	0.023
58	Ce	143		1.004	-	Pr-143	14	d	b-	100	-	742	^{1.2E-06}	-	-	-	-	-	-	-
58	Ce	144		1	-	Pr-144	17	m	b-	100	-	697	1.3	2186	0.69	1489	0.28	697	1489	0.28
59	Pr	141	100	11.5	0.1	Nd-141	2.5	h	EC	98	36.03	1127	0.8	1293	0.46	1147	0.31	146	1147	0.31
59	Pr	143		90	-	Nd-143	stable		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	Nd	142	27	18.7	4.0E-04	Nd-141	2.5	h	EC	98	36.03	1127	0.8	1293	0.46	1147	0.31	146	1147	0.31
60	Nd	143	12	325	-	Pm-143	265	d	EC	100	37.36	742	39	-	-	-	-	-	-	-
60	Nd	144	24	3.603	-	Pm-144	363	d	EC	100	37.36	696	99	618	98	477	44	696	618	98
60	Nd	145	8	43.84	-	Pm-145	17.7	y	EC	100	37.36	72	2.2	67	0.68	-	-	-	-	-
60	Nd	146	17	1.399	-	Pm-146	5.5	y	EC	66	37.36	454	65	736	23	590	0.42	454	736	23
60	Nd	147		431	-	Pm-147	2.6	y	b-	100	-	121	^{0.0029}	197	^{3.4E-07}	76	^{1.2E-08}	-	-	-
60	Nd	148	6	2.493	0.1	Pm-148	5.4	d	b-	100	-	1465	22	550	22	915	12	550	915	12
60	Nd	150	6	1.202	-	Pm-150	2.7	h	b-	100	-	334	68	1325	18	1166	16	334	1325	18
61	Pm	149		1400																
62	Sm	144	3.1	1.64	-	Eu-144	10	s	b+	87.1	-	1660	9.6	818	1.6	2423	0.96	818	1660	1.56
62	Sm	147	15	58.01	0.1	Eu-147	24.1	d	EC	100	40.1	197	24	121	21	678	9	678	121	9

Table 1 Nuclide data base for charged particle activation analysis (9)

対象核種			存在比	反応断面積		娘核種	半減期		崩壊様式		X線エネルギー	シングルガンマ線エネルギー・強度						カスケードガンマ線エネルギー・強度		
Z		A	Abundance	$\sigma(n,\gamma)$	$\sigma(p,*)$	Daughter nucleus	T _{1/2}	unit	Decay mode	I(b+/b-/EC/IT)	EK α	E γ 1	I γ 1	E γ 2	I γ 2	E γ 3	I γ 3	E γ (1)	E γ (2)	I γ (12)
			%	b	b				b+/b-/EC/IT	%	keV	keV	%	keV	%	keV	%	keV	keV	%
62	Sm	148	11.3	2.413	-	Eu-148	54.5	d	EC	100	40.1	550	99	630	72	611	21	550	630	72
62	Sm	149	13.8	40150	0.2	Eu-149	93.1	d	EC	100	40.1	328	4	277	3.6	255	0.64			
62	Sm	150	7.4	108.6	-	Eu-150	12.8	h	EC	100	40.1	334	4	407	2.8					
62	Sm	152	26.7	15160	-	Eu-152	96	m	IT	100		90	70	77.2	0.69					
62	Sm	152	26.7	206.2	-	Eu-152	9.3	h	b-	73	40.1	344	2.4	1315	0.93	970	0.59	970	344	0.59
62	Sm	152	26.7	420	-	Eu-152	9.3	h	EC	28	40.1	842	14	963	12	122	7	122	842	14
62	Sm	154	22.7	8.393	-	Eu-154	46	m	IT	100		68	37	101	27	36	13	127	101	36
63	Eu	151	47.8	9198	0.12	Gd-151	124	d	EC	100	41.5	154	6.2	243	5.6	175	3	154	175	6.2
63	Eu	152		12770																
63	Eu	153	52.2	312.7	0.15	Gd-153	240	d	EC	100	41.5	97	29	103	21	70	2.4	70	103	2.4
63	Eu	154		1842																
63	Eu	155		3758																
63	Eu	156		100																
64	Gd	152	0.2	1056	0.04	Tb-152	18	h	b+	17	43	344	65	586	9.4	779	5.8	344	586	9.4
64	Gd	153			-	Tb-153	2.3	d	EC	99	43	212	31	110	6.8	102	6.4	109	102	6.4
64	Gd	154	2	84.99	0.005	Tb-154	22	h	EC	98	43	123	26	1274	11	2187	9.9	123	1274	11
64	Gd	155	15	60890	-	Tb-155	5.3	d	EC	100	43	87	32	105	25	180	7.5	87	180	7.4
64	Gd	156	20	2.188	-	Tb-156	5.4	d	EC	100	43	534	67	199	41	1222	31	534	1222	30
64	Gd	157	16	254100	-	Tb-157	71	y	EC	100	6.06	55	0.0084	-	-	-	-	-	-	-
64	Gd	158	25	2.496	-	Tb-158	180	y	EC	84	43	944	44	962	20	79	12	962	79	20
64	Gd	160	22	0.7961	0.065	Tb-160	72	d	b-	100	-	879	30	299	26	966	25	879	87	30
65	Tb	159	100	26.52	0.1	Dy-159	144	d	EC	100	44.48	58	2.3	348	9.5E-04	79	4.6E-04	58	79	4.6E-04
66	Dy	156	0.056	33	-	Ho-156M	7.6	m	EC	92	45.99	366	72	266	69	445	57	366	266	72
66	Dy	158	0.095	43	-	Ho-158M	28	m	IT	81	-	67	0.18	-	-	-	-	-	-	-
66	Dy	159		-	-	Ho-159	33	m	EC	99	45.99	121	36	132	24	310	17	121	57	36
66	Dy	160	2.3	56	-	Ho-160M	5	h	IT	73	-	60	0.077	-	-	-	-	-	-	-
66	Dy	161	19	600	-	Ho-161	2.5	h	EC	100	45.99	26	27	103	3.9	77	1.9	26	77	1.9
66	Dy	162	25	194	0.07	Ho-162	15	m	EC	96	45.99	81	8	1320	3.8	1373	0.79	81	1620	3.8
66	Dy	163	25	124	-	Ho-163	4570	y												
66	Dy	164	28	1040	-	Ho-164	29	m	EC	60	45.99	73	1.9	689	5.7E-04	762	4.7E-04	73	689	5.7E-04

Table 1 Nuclide data base for charged particle activation analysis (10)

対象核種			存在比	反応断面積		娘核種	半減期		崩壊様式		X線エネルギー	シングルガンマ線エネルギー・強度						カスケードガンマ線エネルギー・強度			
Z		A	Abundance	$\sigma(n,\gamma)$	$\sigma(p,*)$	Daughter nucleus	T _{1/2}	unit	Decay mode	I(b+/b-/EC/IT)	EK α	E γ 1	I γ 1	E γ 2	I γ 2	E γ 3	I γ 3	E γ (1)	E γ (2)	I γ (12)	
			%	b	b				b+/b-/EC/IT	%	keV	keV	%	keV	%	keV	%	keV	keV	%	
67	Ho	165	100	61.2	-	Er-165	10.36	h	EC	100	47.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	Er	162	0.14	19																	
68	Er	164	1.61	13																	
68	Er	166	33.61	4.6																	
68	Er	167	22.93	659	0.1	Tm-167	9.25	d	EC	100	49.13	208	42	57	4.7	532	1.6	208	57	4.7	
68	Er	168	26.78	2.74	0.08	Tm-168	93.1	d	EC	99.99	49.13	198	55	816	51	448	24	198	816	47	
68	Er	170	14.93	5.8	0.07	Tm-170	128.6	d	b-	99.87	-	84	2.5	-	-	-	-	-	-	-	
69	Tm	169	100	105	0.1	Yb-169	32	d	EC	100	50.74	63	44	198	36	177	22	63	177	14	
70	Yb	168	0.13	2300																	
70	Yb	170	3.04	11.4																	
70	Yb	171	14.28	48.6																	
70	Yb	172	21.83	0.8	0.07	Lu-172	6.7	d	EC	99.99	52.39	1094	63	901	30	182	21	1094	79	63	
70	Yb	173	16.13	17.1																	
70	Yb	174	31.83	69																	
70	Yb	176	12.76	2.85																	
71	Lu	175	97	6.9	0.05	Hf-175	70	d	EC	100	54.1	343	84	89	2.4	433	1.4	114	230	0.68	
71	Lu	176	3	2090																	
72	Hf	174	0.16	561.5																	
72	Hf	176	5.26	23.48																	
72	Hf	177	18.6	373.5																	
72	Hf	178	7.28	84.03	0.025	Ta-177	56.56	h	EC	100	55.79	113	7.2	208	0.94	1058	0.29	113	208	0.94	
72	Hf	179	13.62	42.79																	
72	Hf	180	35.08	13	0.06	Ta-180	8.154	h	EC	86	55.79	93	4.5	-	-	-	-	-	-	-	
73	Ta	181	99.988	20.67	0.07	W-181	121.2	d	EC	100	57.53	6	1	152	0.083	136	0.031	152	6	0.083	
74	W	180	0.12	30																	
74	W	182	26.5	21.71																	
74	W	183	14.31	10.11																	
74	W	184	30.64	1.698	0.005	Re-184	35.4	d	EC	100	59.32	903	38	792	38	111	17	792	111	38	
74	W	186	28.43	37.89	0.05	Re-186	3.7	d	b-	93	-	137	9.5	767	0.033	630	0.029	137	630	0.029	
75	Re	185	37	112	0.01	Os-185	93.6	d	EC	100	61	646	78	875	6.3	881	5.2	125	592	1.3	

Table 1 Nuclide data base for charged particle activation analysis (11)

対象核種			存在比	反応断面積		娘核種	半減期		崩壊様式		X線エネルギー	シングルガンマ線エネルギー・強度						カスケードガンマ線エネルギー・強度			
Z		A	Abundance	$\sigma(n,\gamma)$	$\sigma(p,*)$	Daughter nucleus	T _{1/2}	unit	Decay mode	I(b+/b-/EC/IT)	EK α	E γ 1	I γ 1	E γ 2	I γ 2	E γ 3	I γ 3	E γ (1)	E γ (2)	I γ (12)	
			%	b	b				b+/b-/EC/IT	%	keV	keV	%	keV	%	keV	%	keV	keV	%	
75	Re	187	63	76.4	-																
76	Os	186	1.59	80	-																
76	Os	187	1.96	320	-																
76	Os	188	13.24	4.7	-																
76	Os	189	16.15	25	-																
76	Os	190	26.26	3.9	-																
76	Os	192	40.78	2	0.02	Os-190M	9.9	m	IT	100	-	617	99	503	98	361	95	617	503	98	
77	Ir	191	37	309	0.01	Pt-191	2.9	d	IT	100	-	91	12								
77	Ir	193	63	111	-	Pt-193	4.33	d	IT	100	-	136	0.11								
78	Pt	194	32.967	1.44	-	Au-194															
78	Pt	195	33.832	27.5	-	Au-195															
78	Pt	196	25.242	0.72	-	Au-196															
78	Pt	198	7.163	3.66	0.03	Au-198	2.272	d	IT	100	-	215	77	97	69	180	49	215	97	69	
79	Au	197	100	98.65	0.01	Hg-197	23.8	d	IT	91.4	-	134	34	165	0.26			134	165	0.26	
80	Hg	196	0.15	3080																	
80	Hg	198	10	1.88	-	Tl-198	5.3	h													
80	Hg	199	17	2150	-	Tl-199	7.4	d													
80	Hg	200	23	60	0.01	Tl-200	1.1	d	EC	100	70.8	368	87	1206	30	579	14	368	1206	30	
80	Hg	201	13	7.8	-	Tl-201	3	d													
80	Hg	202	30	4.89	-	Tl-202	12	d													
80	Hg	204	7	0.43	-	Tl-204	3.8	y													
81	Tl	203	30	11.4	0.005	Pb-203	2.16	d	EC	100		279	81	401	3.4	681	0.75	279	401	3.4	
81	Tl	205	70	0.104	-	Pb-205	1.5E+7	y													
82	Pb	204	1.4	0.6606	-	Bi-204	11	h													
82	Pb	206	24	0.0306	0.01	Bi-206	6.2	d	EC	100	75	803	99	881	66	537	31	803	881	66	
82	Pb	207	22	0.712	-	Bi-207	31	y													
82	Pb	208	52	0.0005007	0.02	Bi-208	4.0E+5	y													
83	Bi	209	100	0.03384	0.015	Po-209	102	y													
90	Th	232	100	0.72	0.002	Pa-232	1.31	d	b-	100		969	42	894	20	150	10	454	563	3.4	
92	U	235	0.72	0.72	-	Np-235	396	d													
92	U	238	99.3	99	0.001	Np-238	2.12	d	b-	100	-	984	25	1029	18	1026	8.7	924	102	2.62	