

Photo: Hironori Kirano

Index

「原子力の日」に思う	杉浦 紳之	1
国際規則における放射性核種ごとの 防護上の制限値の導出方法について	早川 信博	3
メスバウアー分光の進展と その物質科学への応用について	野村 貴美	8
アイルランド共和国・ 環境保護庁放射線防護局への滞在記	細田 正洋	13
〔お知らせ〕平成28年度放射線安全取扱部会年次大会 (第57回放射線管理研修会)		19

●「原子力の日」に思う

公益財団法人原子力安全研究協会
理事長

杉浦 紳之*



原子力の日を迎えるにあたり、改めて放射線防護について考えたい。筆者は学生時代から放射線防護を学び、放射線防護を中心とする職業に幸いにも継続して就いてきた。東日本大震災ならびに東京電力福島第一原子力発電所事故から5年余りが経過した。放射線防護に関する自らの経験が何かしら福島のために役立つことはないかと月の半分は福島県内で働くようになった中で考えてきたことを記してみる。

放射線防護の基本的枠組みは、国際放射線防護委員会（ICRP）の勧告に示されている。放射線防護は、Radiation ProtectionではなくRadiological Protectionと綴られる。RadiologicalはRadiology（放射線学）の形容詞である。放射線防護は、その対象を物理的な要因としての放射線に狭く限らず、生物学的なヒトに対する影響のみならず、社会の中で生活する人間を防護することがその目的であると説明される。そのICRP勧告を尊重して日本の法令は作られて来たし、法令取り入れが済んでいない新しい考え方についても事故の対応において参照されてきた。

しかし、この放射線防護の基本的考え方に基づく住民への説明はすべてがストーンと腑に落ちた訳ではなく、いくつもの疑問や議論が起こった。放射線防護の基本的枠組みは、ICRPの基本勧告の構成にあるように、生物

学的影響と線量概念をベースとした上で、放射線防護の基本的考え方が構築されている。

生物学的影響については、100mSv以下で影響があるかないかということが相当に議論された。低線量被ばくの影響は解明されていないとも言われている。疫学調査では統計学的な検出力から実証は不可能であるがリスクは推定できるので、それに基づき一定の影響（リスク）があるものとして基準等に反映されている。いくつかの論文が低線量域での影響が有意に認められたとして話題に上る。このとき議論すべきは、あるかないかよりも、これまでのリスクの推定値よりも大きいか否かであろう。リスクがあるとしていることがどれほど理解されているのであろうか。

線量概念については、周辺線量当量と個人線量当量の相違についての疑問が絶えない。個人線量計は胸に着用するため背面からの放射線が身体により遮へいされ、過小評価になるというものである。結論から言えば、放射線作業用に作られた個人線量計は汚染が一面に広がった一般環境における住民の個人被ばく線量測定について妥当な結果を示すのであるが、簡単な説明は難しい。線量概念がそもそも複雑な上に、上記の2つの線量に加えて実効線量もすべてが同じシーベルト（Sv）という単位で表されているためである。

考え方や基準値に関する議論は、例示すればきりが無いほどある。

計画被ばく状況における公衆の線量限度である1 mSvと現存被ばく状況における長期的目標とされる参考レベルの1 mSvは、同じ1 mSvであり、住民にとって区別して理解することは難しいだろう。また、「法令では管理区域となるような場所に」という言い方に代表されると考えられるが、計画被ばく状況と現存被ばく状況の考え方の違いについて説

* Nobuyuki SUGIURA

● 原子力の日に思う

明はされるものの、現存被ばく状況下では通常時よりも大きな被ばくを認めていることを明快に説明した例をあまり聞いたことはない。

いろいろな説明を住民の方にさせて頂くが、最近ではバランスを良く考えて下さいという機会が増えている。確かにリスクは存在するが、それは小さなものなので、それを避けるために返って大きなリスクを背負いこむようなことはしないで欲しいという意味合いである。従来から放射線防護において最も大切な概念は最適化であると教えられてきたが、最適化もいざ説明しようとすれば難しい。

さて、ICRPは、放射線防護の倫理 (ethics) についてのタスクグループを2013年に設置して本格的に議論を進めている。タスクグループの目的は、勧告の基礎 (basis) を統合し、防護体系についての理解を改善し、放射線リスクとその認知についてのコミュニケーションのための基礎を提供することから、放射線防護の倫理的基盤 (foundation) を示すことと述べられている。検討の初期段階にジャック・ロシャル副委員長から議論の方向性について説明を聞く機会があったが、賢明さ (wisdom) は合理的な決定に寄与すること、思慮深さ (prudence) はALARAにつながることで、価値判断に関しては3つの倫理感 (徳、功利主義、義務) と文化的背景が関係することなどがキーワードとして記憶に残っている。

ICRP勧告は、原則的に各国の規制当局に読まれることを期待して書かれていると説明される。実際、筆者の経験を振り返っても、放射線審議会の議論においてICRP勧告の考え方をどのように我が国の法令に取り入れるか、放射線取扱主任者として現場の放射線管理を行う上でもこの基準値はICRPのここから来ているなどと、規則、基準とリンクした形以外の活用はあまりなかったかもしれない。

ICRPの倫理についての議論は福島

を契機として始められたものではないが、前半に例示した事柄について、考え方や数値について誤りはないものの分かりやすく伝わるかという点について疑問に感じる部分もあることは否めない。社会の中で生活する人間を防護するためには、倫理について議論されている内容にもさらに深く踏み込む必要があることを示しているのであろう。

放射線防護は実学であるといわれる。福島においてしっかりしていないことはまだ多い。福島の立派な美味しい桃のように、放射線防護の実がしっかり実るようにこれからも努力することを肝に銘じたい。

著者プロフィール

昭和36年生まれ 東京都出身
 昭和60年 東京大学医学部保健学科卒業
 平成3年 東京大学大学院医学系研究科社会医学専攻修了 医学博士
 平成3年 日本原子力研究所東海研究所研究員
 平成5年 東京大学助手 (原子力研究総合センター)
 平成17年 近畿大学講師 (原子力研究所)
 平成22年 同教授
 平成23年 独立行政法人放射線医学総合研究所緊急被ばく医療研究センター長
 平成25年 公益財団法人原子力安全研究協会放射線環境影響研究所所長
 平成27年 同理事長。近畿大学客員教授 (原子力研究所)、広島大学客員教授 (原爆放射線医学科学研究所)

学協会関係：
 日本保健物理学会 副会長・理事、編集委員、企画委員など、日本原子力学会 企画委員、編集委員など、日本アイソトープ協会 RADIO-ASOTOPES誌編集委員 など

国・政府関係：
 文部科学省 放射線審議会 委員、内閣府 原子力安全委員会 専門委員、経済産業省 総合資源エネルギー調査会 臨時委員 など

福島事故関連：
 政府 原子力災害対策本部 (OFC) 放射線アドバイザー、文部科学省 放射線量等分布マップの作成等に係る検討委員会、厚生労働省 除染作業に従事する労働者の放射線障害防止対策検討会、環境省 災害廃棄物安全評価検討会、福島県 放射線健康アドバイザー など

国際規則における放射性核種ごとの防護上の制限値の導出方法について



早川 信博*

1. はじめに

日本保健物理学会「放射性核種ごとの防護上の制限値に関する専門研究会」(報告書：<http://www.jhps.or.jp/report/pdf/report9.2.pdf>)として、全8回の会合(2014年6月4日～2016年1月15日)を実施した。放射性核種ごとの防護上の制限値については、「輸送物の放射能収納限度」、「規制免除レベル(放射能濃度、放射能)」、「クリアランスレベル」、「放射性物質の危険数量」等が、放射性核種ごとにその特性を考慮して設定されている。これらの制限値は、外部被ばくについて国際放射線防護委員会(ICRP)のPubl.60(1990年勧告)に基づくPubl.74の線量換算係数を、また、内部被ばくについてPubl.66(呼吸気道モデル)やPubl.30以降導入された体内動態モデル等に基づくPubl.68の線量係数をそれぞれベースとして算出されている。

ICRPでは、既に外部被ばく評価に用いる線量換算係数をPubl.103(2007年勧告)、Publ.110(標準人ボクセルファントム)等によって見直し、Publ.116として出版している。また、内部被ばく評価に用いる体内動態モデルについて、Publ.30の胃腸管モデルからPubl.100のヒト消化管モデルへの切り替え、Publ.66のヒト呼吸気道の一部改訂等が検討されるとともに、線量係数の見直しが進められている。これらのICRPでの見直しを受け、現行の放射線防護上の核種ごとの制限値が、今後国際原子力機関(IAEA)を中心とした国際的な場で再評価されるはずである。

従って本研究会では、各防護上の制限値に対して国際的な再評価の前に先導的に調査検討を行い、その結果を取りまとめることにより、今後の国際的な議論に資する情報を適用することを目的とした。

2. 放射性核種ごとの防護上の制限値について

IAEAでは、ICRPの勧告に基づいて放射性核種ごとの防護上の制限値について検討し、IAEA安全基準(安全要件及び安全指針)等として発行している。過去のIAEAでの検討の場では、欧州委員会(CEC)を中心に検討された数値が祖上に供されてきた歴史がある。

IAEAの安全基準自体に国際的な強制力はないものの、日本国内では必要に応じて国際的な整合を図るため、放射線審議会における審議を経て、国内法令に概ね取り入れられている。なお、IAEAの安全要件「放射性物質安全輸送規則」については、国際連合(UN)の「危険物輸送に関する勧告」に取り入れられ、国際海事機関(IMO)や国際民間航空機関(ICAO)の条約を介して、海上輸送と航空輸送について国際的な強制力を有し、また欧州等では道路輸送及び鉄道輸送について域内で強制力を与えられている。

国内規則においてはICRPの勧告を反映する努力が行われており、昭和33年に設立された放射線審議会の活動をとおして齊一化が図られている。国内規則では日本独自に評価されたものもあるが、最近IAEAの安全基準に数値の掲載がある場合には、国内での確認計算を経て、それとの整合が図られる傾向にある。

3. 国際規則における核種ごとの制限値の導出方法

ここでは、IAEAの安全基準等に掲載がある防護上の制限値の導出方法について説明する。

▷ A_1 値および A_2 値(SSR-6(SSG-26)に記載)

A型輸送物の核種ごとの収納放射能限度 [TBq] を定める値

* Nobuhiro HAYAKAWA MHIニュークリアシステムズ・ソリューションエンジニアリング(株) 放射線システム安全技術部 主幹

- ▷規制免除値(欧州委員会RP-65)
通常時および事故時に、ヒトへの健康障害のリスクが無視できるレベルであり、それを取り扱う行為などを規制の枠外にできる放射能の濃度[Bq/g]および放射能[Bq]の限度値である。
- ▷クリアランスレベル(RS-G-1.7(SRS No.44))
施設の廃止措置等によって発生する大量の放射性廃棄物を、環境負荷低減等を目的としてリサイクルするために、放射性物質として扱う必要のない区分を設けるためのもの。
- ▷危険量D値(RS-G-1.9/EPR-D-VALUES 2006)
危険量D値は、放射性物質が管理下にはなくなった場合、被ばくした人が死亡又は生活の質を低下させる深刻な障害を起こし得る放射性物質の量である。

3.1 A₁値およびA₂値

(1)基本的概念

- ▷A₁値：非散逸性の固体状放射性物質、または放射性物質を収納している密封カプセル(特別形放射性物質)に対する値
- ▷A₂値：特別形放射性物質以外(非特別形放射性物質)の放射性物質に対する値
- ▷A₁/A₂値は、その他の輸送物の収納限度の尺度としても利用されている。

(2)想定シナリオ(被ばく経路)

- ▷光子(中性子)による外部被ばく(Q_A値)
- ▷電子による外部被ばく(Q_B値)
 - ・破損した輸送物から1mの距離に30分間滞在する。
- ▷吸入摂取による内部被ばく(Q_C値)
 - ・エアロゾルとして収納放射能の10⁻⁶が吸入摂取される。
- ▷汚染の転移による皮膚被ばく(Q_D値)
 - ・収納放射能の1%が皮膚に5時間付着する。
- ▷サブマージョンによる外部被ばく(Q_E値)
 - ・ガス状の収納放射能が100%放出され、4回/時の換気が行われる300m³の室内に30分間滞在する。

(3)収納限度Q値の導出

- Q値(Q_A～Q_E値)は以下の基準に基づいて導出される。
- ▷事故に伴って輸送物の近傍で被ばくする従事者の実効線量又は預託実効線量は、50[mSv]の参照線量を超えてはならない。
 - ▷事故に巻き込まれた従事者の皮膚を含めた組織・器官が受ける線量又は預託等価線量は、0.5[Sv]

を超えてはならず、特別な場合として、水晶体は0.15[Sv]を超えてはならない。

- ▷事故後、従事者が輸送物から1[m]の場所に30分以上留まる可能性は低い。

(4)参照線量

- (預託)実効線量：0.05[Sv](Q_A, Q_C, Q_E)
- 皮膚を含めた個々の臓器の等価線量：0.50[Sv](Q_B, Q_D)
- 水晶体の等価線量：0.15[Sv]

$$\text{例) } Q_C[\text{TBq}] = \frac{D}{1 \times 10^{-6} \cdot DC_{inh}} \times C$$

- D：参照線量 0.05[Sv]
- 1 × 10⁻⁶：輸送物収納量に対する吸入割合[-]
- DC_{inh}：放射性核種ごとの吸入実効線量係数 [Sv/Bq]
- C：10⁻¹²[TBq/Bq]

従って、収納量がQ_C値[TBq]以下であれば、吸入摂取被ばく経路を想定しても線量限度(参照線量)以下となる。

(5)A₁値およびA₂値の導出

- ▷A₁値：特別形(飛散しないもの)
Q_A値とQ_B値のうち、小さい値。
A₁ = min(Q_A, Q_B)
- ▷A₂値：非特別形(飛散するもの)
A₁値、Q_C値、Q_D値およびQ_E値のうち、最も小さい値。
A₂ = min(A₁, Q_C, Q_D, Q_E)

3.2 規制免除値

(1)基本的概念

通常時および事故時に、ヒトへの健康障害のリスクが無視できるレベルであり、それを取り扱う行為などを規制の枠外にできる放射能の濃度[Bq/g]および放射能[Bq]の限度値である。

(2)想定シナリオ(被ばく経路)(表A)

(3)規制免除値の導出

- ① 1[Bq/g]の放射能濃度または1[Bq]の放射能あたりの各被ばく経路における実効線量、皮膚等価線量を計算する。
- ② 各被ばく経路の実効線量、皮膚等価線量をそれぞれ被ばく経路のグループ毎に合算する。
- ③ 個々のグループ毎の免除値を次式で計算する。

$$\text{グループ毎の免除値(放射能, 放射能濃度)} = \frac{\text{線量基準値}}{\text{(2)合算線量}}$$

	線量基準[mSv/年]	
	実効線量	皮膚等価線量
普通の場合(通常時)	0.01	50
最悪の場合(事故時)	1	50

④③で計算されたグループ毎の免除値のうち、最小値を採用する。

3.3 クリアランスレベル

(1) 基本的概念

施設の廃止措置等によって発生する大量(1トンのオーダーを超える)の放射性廃棄物を、環境負荷低減等を目的としてリサイクルするために、放射性物質として扱う必要のない区分を設けるためのもの。

(2) 想定シナリオ(被ばく経路) (表B)

(3) 線量基準

人工起源放射性核種について、10μSv/年を基準線量に用いる場合に現実的パラメータを使用し、1mSv/年を基準線量として用いる場合には低確率なパラメータを使用する。なお、皮膚被ばくの基準線量としては確定的影響を防ぐため50mSv/年が用いられる。

(4) クリアランスレベルの導出

- ▷ 各被ばく経路の線量基準に対する放射能濃度を導出
- ▷ 放射能濃度が最小となる経路の値をクリアランスレベルとする。

<被ばく経路の例> :

外部被ばく(WL, WF, WO, RH, RPシナリオ)

$$E_{ext,C} = \dot{e}_{ext} \cdot t_e \cdot f_d \cdot e^{-\lambda \cdot t_1} \cdot \frac{1 - e^{-\lambda \cdot t_2}}{\lambda \cdot t_2}$$

$E_{ext,C}$: 物質中の単位放射能濃度当たりの外部被ばくによる1年間預託実効線量[(μSv/y)/(Bq/g)]

\dot{e}_{ext} : 照射体系、距離、遮蔽、及び年齢層等に応じた物質中の単位放射能濃度当たりの平均実効線量率[(μSv/h)/(Bq/g)]

t_e : 被ばく時間[h/y]

f_d : 希釈係数[-]

表A 想定シナリオ(被ばく経路)

シナリオ	放射能濃度に関する被ばく経路	放射能に関する被ばく経路	
作業 者 事 故 時	A1.1 線源取扱いによる外部被ばく	B1.1 点線源からの外部被ばく	
	A1.2 1m ³ 線源からの外部被ばく	B1.2 線源取扱いによる外部被ばく	
	A1.3 気体容器からの外部被ばく		
	A1.4 粉塵、揮発性物質の吸入摂取		
	A1.5 汚染した手からの経口摂取		
	通常時と同じ 被ばく時間や発生確率を考慮すると、通常使用時の方が被ばく線量が高くなるため、本項目の計算は実施していない。		飛散
			B2.1 汚染した手からの外部被ばく
			B2.2 汚染した顔からの外部被ばく
			B2.3 汚染した床面からの外部被ばく
			B2.4 汚染した手からの経口摂取
B2.5 再浮遊放射線の吸入摂取			
B2.6 エアロゾル、ダスト雲からの外部被ばく			
火災			
B2.7 皮膚の汚染			
B2.8 粉塵、揮発性物質の吸入摂取			
B2.9 燃焼生成物からの外部被ばく			
公衆 処 分 場	A3.1 処分場からの外部被ばく	B3.1 処分場からの外部被ばく	
	A3.2 処分場からのダストの吸入摂取	B3.2 処分場からの吸入摂取	
	A3.3 処分場での経口摂取	B3.3 処分場の物の取扱いによる皮膚被ばく	
		B3.4 処分場での経口摂取	

表B 想定シナリオ(被ばく経路)

シナリオ	説明	被ばく対象	関連した被ばく経路
WL	処分場の作業員又はその他の施設の作業員(鋳物工場以外)	作業員	処分場における外部被ばく 処分場における吸入摂取 汚染物質の直接経口摂取
WF	鋳物工場の作業員	作業員	鋳物工場における機材やスクラップからの外部被ばく 鋳物工場における吸入摂取 汚染物質の直接経口摂取
WO	その他の作業員(トラック運転手など)	作業員	トラック上の機材又は積み荷からの外部被ばく
RL-C	処分場又はその他の施設の近隣住民	子供(1~2y)	処分場又はその他の施設の付近での吸入摂取 汚染した土壌で育った汚染された食品の経口摂取
RL-A		成人(17y以上)	処分場又はその他の施設の付近での吸入摂取 汚染した土壌で育った汚染された食品の経口摂取
RF	鋳物工場の近隣住民	子供(1~2y)	鋳物工場付近での吸入摂取
RH	汚染物質で建てられた住居の住民	成人(17y以上)	住居内での外部被ばく
RP	汚染物質で建てられた公共の場の付近の住民	子供(1~2y)	外部被ばく 汚染した粉塵の吸入摂取 汚染物質の直接経口摂取
RW-C	私設井戸からの水の使用や汚染した河川からの魚の消費をする住民	子供(1~2y)	汚染された飲料水、魚、及びその他の食品の経口摂取
RW-A		成人(17y以上)	
SKIN	スクラップ置き場や金属リサイクル施設などの埃っぽい環境の作業場(低確率シナリオのみに適用)	作業員	埃っぽい環境の作業場で起こり得る放射性物質を含む粉塵による皮膚汚染

λ : 崩壊定数[y⁻¹]

t_1 : シナリオ開始前の減衰時間[y]

t_2 : シナリオ期間中の減衰時間[y]

3.4 危険量D値

2005年に出版されたIAEAの安全指針「放射線源の分類(RS-G-1.9)」において、放射線源が有する危険度に応じて管理のレベルを決めるためのD値が、²⁴¹Am/⁹Beや²³⁹Pu/⁹Beを含む33核種について、専門家による判断を取り入れた専門家アプローチによって定められた。

また、2005年以降の「国際原子力事象尺度 (INES)」における輸送事故時の評価にもD値が使用されることとなったことから、「放射性物質安全輸送規則」の対象核種に対応する値が、より理論的なリスクアプローチによって追加算出され、²⁴¹Am/⁹Beや²³⁹Pu/⁹Beを含む合計373核種が、2006年にIAEAが出版した「放射性物質の危険数量D値 (EPR-D-VALUES 2006)」に収められた。

ここでは、リスクアプローチによるD値の導出方法について示す。

(1) 基本的概念

危険量D値は、放射性物質が管理下にはなくなった場合、被ばくした人が死亡又は生活の質を低下させる深刻な障害を起こし得る放射性物質の量であり、最小臨界量と化学的毒性も考慮している。飛散しない場合(D₁値)と飛散する場合(D₂値)に分類して評価し、低い値をD値とする。D値では以下の健康障害を考慮している。また、セキュリティ分野でも利用される。

- ▷ 致死性の障害として、赤色骨髄障害、結腸障害、肺炎、重篤な皮膚影響
- ▷ 非致死性の障害として、軟組織の壊死、甲状腺の壊死・炎症、白内障、不妊・排卵・精子増殖抑制など

(2) 想定シナリオ(被ばく経路)

- I. ポケット：遮蔽のない線源(500gまで)をポケットに保有(10時間)し、近接の軟組織に影響を及ぼす。
- II. 室内：室内に放置された遮蔽のない線源(1 tonまで)が放置され(100時間)、全身に被ばくする。
- III. 吸引：火災、爆発によって飛散した空気中(300m³の室内)の放射性物質の1×10⁻⁴の割合を吸引し、30分間滞在し、内部被ばくを受ける。
- IV. 経口摂取：火災、爆発によって飛散した汚染により、不注意で経口摂取する場合と、汚染された飲料水を飲む場合(1000m³の水に全て溶解し2ℓ/日で5日間)に、内部被ばくを受ける。
- V. 汚染：火災、爆発により飛散した放射性物質が皮膚に付着し(全放射能の内1×10⁻²が5時間付着)、皮膚の外部被ばくを受ける。
- VI. 浸漬：火災、爆発により、放射性の希ガスが室内(300m³)に充滿し、30分間滞在して外部

外部被ばくからのRBE加重線量の閾値レベル(D₁値)

被ばく経路	影響	臓器・組織	閾値レベル[Gy·Eq*]
隣接線源からの軟組織の被ばく	軟組織の壊死	軟組織	25
表面汚染からの接触被ばく	湿性落屑	皮膚真皮	10
遠隔線源又は浸漬による全身被ばく	注) 参照	胴	1

注) 数値は全身均等照射による重篤な確定的健康影響の発現に対する最小の閾値線量である。
 *Gy·Eq(Gy Equivalent：生物学的等価線量)：吸収線量にRBEを乗じた値

内部被ばくからの預託RBE加重線量の閾値レベル(D₂値)

被ばく経路	影響	標的臓器・組織	閾値レベル	
			数値[Gy·Eq]	預託期間[d]
吸入又は経口摂取	造血器症候群	赤色骨髄	0.2(原子番号≥90)	30
			2(原子番号≤89)	
吸入摂取	肺炎	呼吸気道肺胞-間質領域	30	30
吸入又は経口摂取	胃腸症候群	結腸	20	30
吸入又は経口摂取	甲状腺機能低下症	甲状腺	2	365

被ばくを受ける。

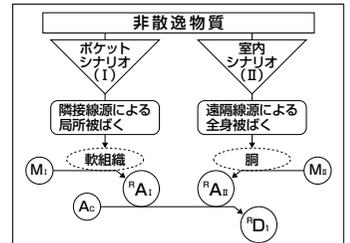
(3) 閾値レベル

閾値レベルとは、理論的に、被ばくを受けた人の5%に影響を引き起こす線量である。

(4) D₁値の導出

使用するシナリオは飛散しない線源による以下の2つである。

- ▷ 隣接線源からの局所被ばくを対象とする



- “ポケット”シナリオ(シナリオ I)
- ▷ 遠隔線源からの全身被ばくを対象とする“室内”シナリオ(シナリオ II)

^RA_I：軟組織に重篤な確定的健康影響を引き起こしうる初期放射能[Bq]

M_I：シナリオ I の質量限度 5×10²[g]

^RA_{II}：胴に重篤な確定的健康影響を引き起こしうる初期放射能[Bq]

M_{II}：シナリオ II の質量限度 1×10⁶[g]

A_C：最小臨界量[Bq]

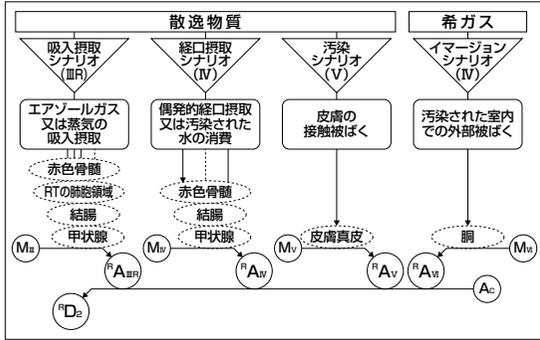
$$^R D_1 = \min \{ ^R A_I, ^R A_{II}, A_C \}$$

(5) D₂値の導出

使用するシナリオは飛散した放射性核種による以下の4つである。

- ▷ 吸入摂取 (シナリオ III R)
- ▷ 経口摂取 (シナリオ IV)
- ▷ 皮膚汚染 (シナリオ V)
- ▷ 放射性希ガスによる浸漬(シナリオ VI)

^RA_{III~VI}：各シナリオで対象臓器・組織に重篤な確定的健康影響を引き起こしうる初期放射能[Bq]



$M_{III \sim VI}$: 各シナリオの質量限度 [g]
 希ガス : ${}^R D_2 = \min \{ {}^R A_{VI}, A_C \}$
 その他の核種 : ${}^R D_2 = \min \{ {}^R A_{III}, {}^R A_{IV}, {}^R A_V, A_C \}$

(6) D値の導出

D_1 値と D_2 値の小さい方を D 値とする。
 ${}^R D = \min \{ {}^R D_1, {}^R D_2 \}$

注) 上付き R は、リスクアプローチによって導出される D 値を表す。専門家アプローチの場合は E が付く。

4. 制限値導出上の課題

- ▷ 参照線量、被ばく経路等の見直しについては、被ばく状況のタイプ(計画、緊急時被ばく状況)、事故の発生頻度、被ばくカテゴリー(職業被ばく、公衆被ばく)等について考慮し、輸送の実態に即して検討する必要がある。
- ▷ ICRP 最新データへの更新(線量換算係数、原子核崩壊データ)
 - ・ ICRP Publ.116(外部被ばく線量換算係数)、Publ.107(原子核崩壊データ)等
- ▷ 評価方法の高度化
 - ・ 各被ばく経路において最新のモンテカルロ法コードによる詳細な輸送計算を実施して、皮膚組成の模擬、制動放射、及び輸送物の電子に対する自己(残留)遮蔽の効果を考慮すべきである。自己遮蔽については、 A_1 値および A_2 値の電子による外部被ばくシナリオで考慮されており、電子窓保護具や輸送物の破片などの物質に伴う残留遮蔽を想定している。
 - ・ 体内におけるコンプトン散乱・光電効果は、最新換算係数 ICRP Publ.116 を用いることで考慮される。

5. おわりに

2011年にHPAが公表した現行値の再現計算結果の報告「 A_1 及び A_2 値並びに規制免除値を計算する方法の再評価(HPA-CRCE-027)」によれば、 A_1 値及び A_2 値においては、計算過程を含めて数値を再現できない核種が383核種中52核種あり、理由として子孫核種の取り扱いの誤り等が指摘されている。なお、32核種が外部被ばく(Q_A/Q_F 又は Q_B)、29核種が吸入摂取(Q_C)、5核種が皮膚汚染(Q_D)で各々相違しており、 A_1 値又は A_2 値そのものが再現できない核種は32核種ある。また、輸送の規制免除値においては、数値を再現できない核種が383核種中2核種あり、理由として計算上の誤り等が指摘されている。これらについては、国内でも同等の再現計算が実施されており、概ね同様の評価結果を得ている。これらの結果からも分かるように、防護上の制限値は過去から長期間にわたって様々なデータ、シナリオ、考え方等に基づき作成されてきたが、次第にそれらの経緯が記載された文書に関する記憶・情報が時間と共に失われて、制定されてきた制限値の根拠を探ることが困難となりつつあることも事実である。

今後、ICRPの2007年勧告とそれに続く出版物に基づき、IAEAの専門家会合や技術会合で、放射性核種ごとの防護上の数値の見直しが本格的に検討されることが予想される。その際は、上記のように制限値の再現性を失わないように正式に文書化することが重要である。また、国内法令への適切かつ合理的な規則取り入れのためには、事前に国内でも検討を行い、計算結果の検証及び規制上の妥当性等も審議した上で、国際会議の議論に参加し国内で検討した値が取り入れられるよう働きかけることが望ましい。

著者プロフィール

- 2001年3月 武蔵工業大学(現 東京都市大学) 大学院 工学研究科 原子力工学専攻 修了
- 2001年4月 コンピュータソフト開発(株)入社
- 2009年4月 MHIグループ会社合併により、MHI原子力エンジニアリング(株)所属
- 2015年7月 MHIグループ会社合併により、MHIニュークリアシステムズ・ソリューションエンジニアリング(株)所属となり現在に至る。
- 2015、2016年 放射性物質等の国際輸送規則に係る検討会 放射線防護に係る基礎的数値等分科会 委員
 - ▷ 入社後、軽水炉・Na炉・ガス炉等の安全解析や動特性解析コードの開発に従事。
 - ▷ その後、放射性物質の大気・海洋拡散被ばく評価コードの開発に従事して特許を取得。
 - ▷ 現在はモンテカルロコードによる遮蔽・被ばく評価、モンテカルロコード入力データとCADデータの幾何形状データの相互変換システムGEOMIT、放射線防護上の制限値算出システムBRACSS、および内部被ばく評価コードBRAIDの開発に従事。

メスbauer分光の進展と その物質科学への応用について



野村 貴美*

1. はじめに

著者が長年携わってきたメスbauer分光を概観してみよう。この分野は、1958年R. Mössbauerが¹⁹²Ir線源のドップラー効果を用いて変調した γ 線の核共鳴吸収を測定し、その吸収率が低温になると高くなる現象をはじめて観測したことに始まる。核が反跳を受けずに γ 線が核共鳴吸収することを明らかにして1961年に31歳の若さでノーベル賞に輝いた。この現象は、彼の名に因んでメスbauer効果と呼ばれる。これまでさまざまな核種で観測されてきたが、現在も多く利用されているのは、鉄のメスbauer分光である。⁵⁷Feの同位体存在率が2.2%の自然鉄を含む材料や物質でも、⁵⁷Co線源(半減期270日)の14.41keVを用いて室温で容易に吸収スペクトルが観測される¹⁾。メスbauer分光は、鉱物学、物理学、化学、工学、医学など幅広く応用され、最近では、触媒ナノ粒子、磁性ナノ粒子、高温超伝導物質、スピנקロスオーバー錯体などの解析などに利用されている。また、2004年にはミニメスbauer分光器(約400g)が火星探査機にはじめて搭載され、岩石などに水を含む鉱物(鉄ミョウバン石)を発見し、活躍したことが知られている²⁾。

この分光の魅力は、スペクトルのエネルギー分解能が約 10^{-8} eVと不確定性原理に基づくゆらぎの2倍に近い究極の分解能を有することである。メスbauer効果は原子核の現象であるが、核とそれを取り巻く電子、核四極子と電場勾配および核磁気双極子と磁場との相互作用を反映して、スペクトルには、それぞれ超微細構造(異性体シフト:スペクトル重心のシフト、四極子分裂:2本ピーク、磁気分裂:6本ピーク)が現れ、物質に含まれる核共鳴原子の価数、結合の配位数、内部磁場の大きさなど、他の分光法では得がたい情報が得られる。ここでは、この分光法の進展を概観し、原子核をプローブとして著者が携わってきたトピックスに触れよう。その他のトピックスは、RADIOISOTOPES³⁾誌に掲載されている。

2. 散乱法の検出器の開発⁴⁾とその応用解析

測定法は、線源、試料、検出器の配置によって透過法、散乱法、発光法に分類され、それぞれ固体バルク、固体表面層、線源をドーブした試料の情報が得られる。透過法は、当初から用いられてきた一般的な方法である。散乱法は、1980年以降に固体表面層の分析に応用され、盛んに利用されるようになった。 γ 線は、透過力が高いので本来固体の表面分析には向かない。しかし、図1の内部転換過程に示したように⁵⁷Feの γ 線の内部転換係数($\alpha=8.2$)が大きいので、⁵⁷Feの共鳴吸収効果を100%とし、内部転換電子をすべて検出すると、その効率は約150%になる。幾何学的に検出効率が低い検出器を用いれば、Feの原子数が少ない表面層でも透過法と同じくらいの時間で測定ができる。転換電子を検出すればその飛程に相当する約200nmの固体表面の情報が、また放出される転換X線を検出すれば10 μ m以内の厚い表層の情報が得られる。前者は、転換電子メスbauer分光(CEMS: Conversion Electron Mössbauer Spectrometry)、後者をX線メスbauer分光(XMS: X-ray MS)と呼ぶ。転換電子と転換X線を同時に検出してそれぞれのスペクトルが得られる二重カウンターを開発

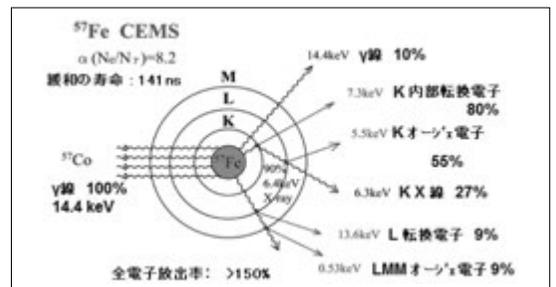


図1 ⁵⁷Feのメスbauer効果後の内部転換過程
 γ 線核共鳴を100%とした場合の全電子放出率: 約150%、 α : 内部転換係数、励起核の緩和寿命時間: 141ns,

* Kiyoshi NOMURA 日本放射線安全管理学会 顧問/NPO放射線安全フォーラム 監事

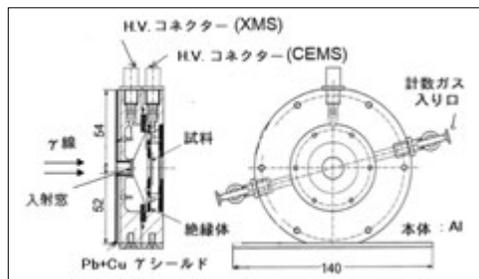


図2 開発したCEMSとXMS用の後方散乱型2重比例計数管。セルは、電子検出のためHe+CH₄ガス(CEMS用)で、その外側をX線検出のためAr+CH₄ガス(XMS用)で満たした2重構造になっている。いずれも14.41keVの入射γ線の影響は小さい。

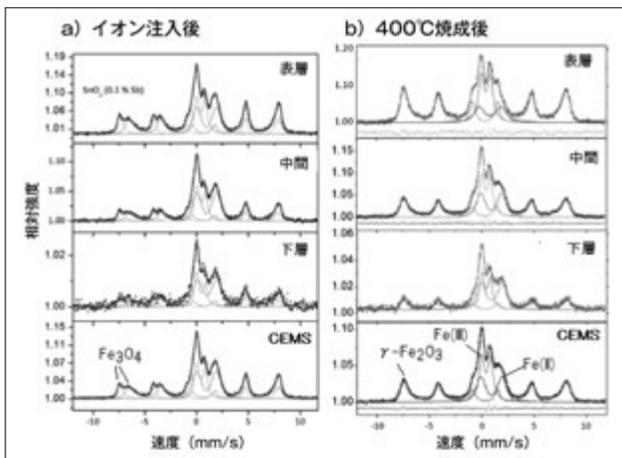


図3 透明導電性酸化スズ薄膜(基板温度500°C)に⁵⁷Feイオンを注入した薄膜のDCEMSのスペクトル(a)および注入後に焼成した皮膜のDCEMS(b)。CEMS：すべてのエネルギー領域の電子検出。

した。後に改良した二重カウンターを図2に示す⁴⁾。また、電子のエネルギーの高い領域と中程度および低い領域に分けて、検出した電子のメスバウアースペクトルを同時に測定できるようにした。固体内部で生じた転換電子は、表面に出てくるまでにエネルギーの損失を受けるので、低いエネルギーになる。エネルギー分解能のよい電子分光装置で測定すると一ヶ月近くかかるが、Heガス比例計数管を用いると深さの精度は良くないが一週間以内で測定ができる。これらを深さ選択性CEMS (Depth selective CEMS) またはエネルギー弁別CEMS (Differential CEMS) と呼ぶ。いずれもDCEMSという。

Heガス比例計数管を用いてDCEMSを測定した例を図3に示す⁵⁾。酸化スズ膜に5 x 10¹⁶/cm² ⁵⁷Feイオンを注入した試料とその後焼成した試料のDCEMSのスペクトルである。これら皮膜は、いずれも光磁気効果(カー効果)を示す透明な磁性半導体である。焼成後のピーク強度比から下層にはFe²⁺が多く、表層にFe³⁺が多い。また表層で多く形成した強磁性のマグネタイト(Fe₃O₄)のクラスターは、熱処理で強磁性のマグヘマイト(γ-Fe₂O₃)に変化する。700°Cの熱処理ではカー効果は消えないが、850°Cで消える。これは、弱磁性のヘマタイト(α-Fe₂O₃)が生じるためである。マグヘマイトは、マグネタイトと同じ結晶形なので、X線回折では区別が付かない。(この論文は、J. Nucl. Radiochem. Sci.の2010年の論文賞になる⁶⁾)。また、石英ガラス(SiO₂)に⁵⁷Feイオンを注入すると金属鉄の磁気緩和スペクトルが得られ、ガラスのネットワーク構造内に数nmの金属鉄ナノ粒子が主として生じることが分かった⁷⁾。この試料を高温で焼成するとマグネタイトとマグヘマイトを経て950°Cでエプシロン相(ε-Fe₂O₃)が生成した。ナノ空間で生成するエプシロン相(4種の内部磁場を示すFe³⁺)は、最近注目されている保磁力の大きい強磁性酸化物である。

火星探査においてドイツ・マインツ大のKlingelhöferらがXMSにより鉄ミョウバン石の存在を発表したが、当初、鉄ミョウバン石(Fe³⁺)の大きい四極子分裂の内側にある小さい四極子分裂の起源が不明であった⁸⁾。著者らも地球産の鉄ミョウバン石をCEMSとXMSにより測定した。熱分解により、分裂幅の狭い四極子分裂が出現し、また、試料内部でヘマタイト(6本ピークの内の4本)が観測された。室温で吸水すると鉄ミョウバン石の分裂幅の広い四極子分裂の強度が大きくなった(図4)⁹⁾。このように水の吸蔵と脱離によって鉄ミョウバン石には2種類のFe³⁺の状態が存在することを明らかにした。

3. 放射光における核共鳴実験

1990年代、放射光の単色化技術が進み、このビームを利用して核共鳴吸収の実験が行われるようになった。日本でも菊田愷志先生(元東大工)らによって、つくば市の高エネルギー研究所の放射光施設で放射光X線の超単色化(meVの幅)が進められ、核共鳴の寿命(141ns)を利用して前方散乱(NFS)¹⁰⁾と非弾性散乱(NIS)¹¹⁾のスペクトルが観測できるようになった。その後、高輝度光科学研究センター(SPring-8)において物性研究への応用が展開されている。NFSでは、試料の厚さによるダイナミックビートと核励起準位に基づく量子ビートが重なった時間スペクトルが得られる。これをフーリエ変換して従来のスペクトルにすることが可能である。放射光の超単色ビームは、指向性がよく小さいビームサイズなので、試料の大きさが制限されるような高温高圧下の測定や放射性同位元素(RI)の線源が得

られない場合には、重宝される。NISでは、結晶格子の振動（フォノン）の生成と消滅に伴う非弾性散乱ピークが弾性散乱ピークの両側に生じる。これは、

従来のメスbauer情報とは異なり、注目する共鳴核原子の局所フォノンの状態密度（VDOS）を反映する（図5a）。このVDOSが求まるとデバイモデル

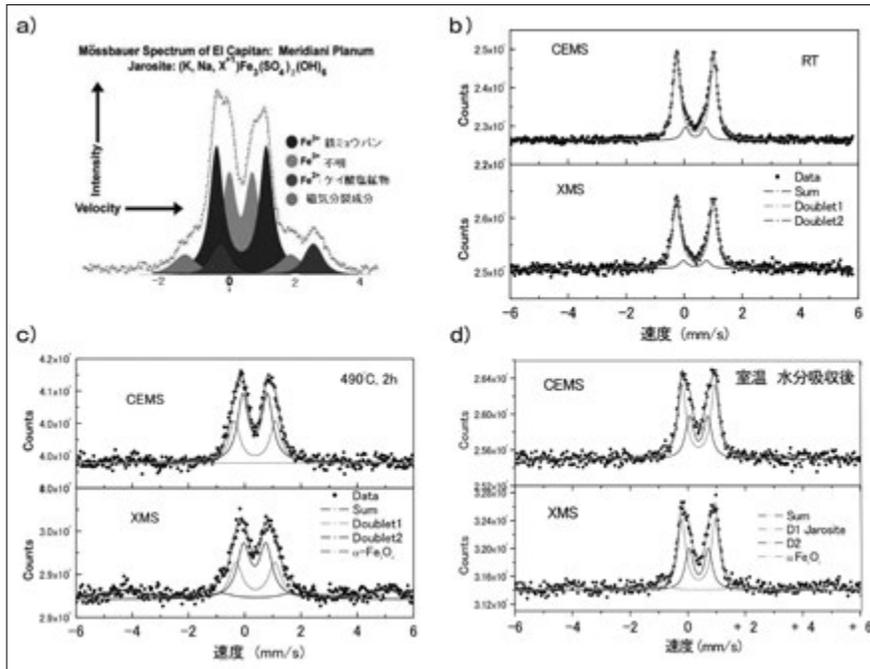


図4 火星の鉱物のXMS(NASA発表)と茅野産の鉄ミョウバン石のCEMSとXMSスペクトル
 a) メリデアニン平原のE1キャプテンの鉱物(鉄ミョウバン石を多く含む)
 b) 茅野産の鉄ミョウバン石(採取サンプルそのまま)、
 c) 鉄ミョウバン石を490°C、2時間熱処理後、
 d) 熱処理後に室温で水分を吸収

に基づいて無反跳分率(f_{LM})を求めることができる¹⁰⁾。NISは、一種の核共鳴のラマン分光といえる。NISは、単結晶、多結晶、アモルファス、ナノ粒子、液体などの試料形態に依らず測定することが可能である。

一方、天然ガスを有効利用するためにメタンのカップリング触媒の研究を行っていたとき、ペロブスカイト複酸化物は、安定な二酸化炭素を高温でよく吸収することを見つけた¹²⁾。その複酸化物のNISを測定して、VDOSの関数 $g(E)$ を得た(図5b)。ペロブスカイト(ABO_3)とブラウンミレライト($ABO_{2.5}$)の中間の酸素欠陥の複酸化物のVDOSには、置換

する元素により多くのピークが現れ、VDOSの重心が変わる、また、酸素欠陥によって生じる四面体位置の鉄に起因して現れる10meV以下のフォノンピークが、炭酸ガスを吸収すると消失し、無反跳分率が小さくなる、ことが分かった¹³⁾。

4. 加速器短寿命RIイオン注入による発光法

加速器を用いてメスbauer効果を観測するクーロン励起の実験や短寿命RIのイオン注入による実験が行われてきた。日本でも小規模ながら行われているが、欧州原子核研究機構(CERN)のISOLDEにおいてRIビームラインが整備され、イオン注入による応用研究が精力的に始まっている。

ところで、10年以上前から酸化物ナノ粒子の奇妙な磁性の振る舞いに興味を持ち、この種の研究¹⁴⁾をしてきたが、国際

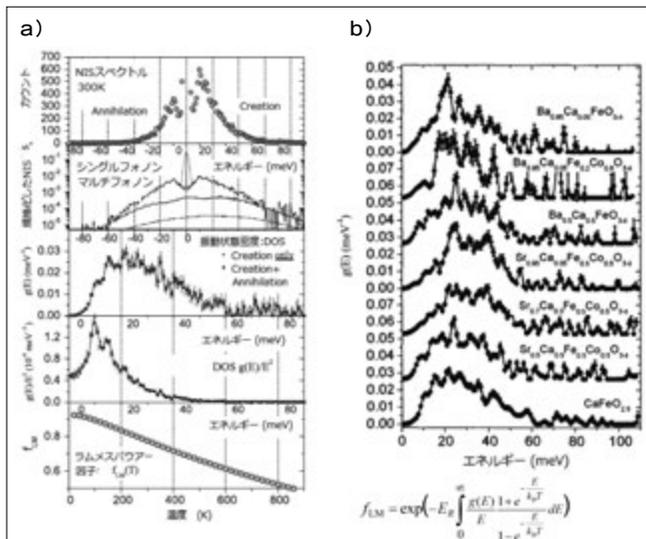


図5 a) NISスペクトルからフォノン(振動)状態密度 $g(E)$ 、 $g(E)/E^2$ および無反跳分率 f_{LM} への変換とb) 様々なペロブスカイト酸化物のフォノン(振動)状態密度 $g(E)$

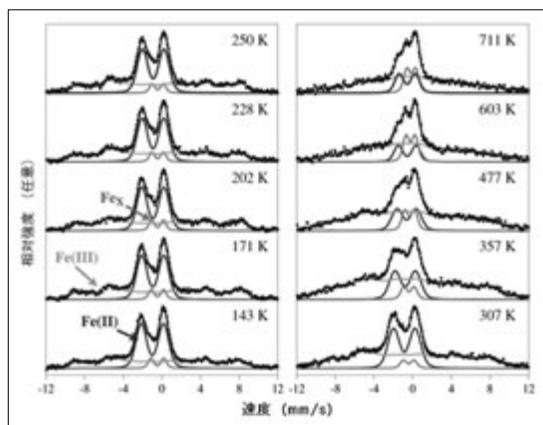


図6 CERNのISOLDEで得られた $^{57}\text{Mn}/^{57}\text{Fe}$ 発光メスバウースペクトル (線源+試料と標準試料の相対速度は、通常のスペクトルと逆になる)

会議でお会いしたHyperfine Interactions編集委員長のG. Langouche博士に誘われて、数年前からISOLDEのメスバウアーグループに参加している。ここでは、1.4GeVのプロトンを炭化ウランターゲットに照射し、レーザー質量分離して得られた ^{57}Mn ($T_{1/2}=1.5\text{m}$) などの短寿命核種を40-60keVのエネルギーで目的試料に打ち込むことができる。同時にその試料から放射される γ 線を、往復運動(ドップラー速度)で稼働するアバランチ共鳴ガスカウンター(^{57}Fe 濃縮ステンレス鋼箔内蔵)で測定する。打ち込み量が約 $10^{-4}\%$ でも10分間程度測定すれば、質の良い ^{57}Fe 発光メスバウースペクトル(eMS)が得られる。透明な酸化スズ半導体膜に ^{57}Mn を打ち込み、 ^{57}Fe のeMSを測定した例を図6に示す。酸化スズ格子の乱れた位置に占める Fe(II) と Fe_x の四極子分裂のほかにスピンの向きがゆっくり動く緩和スペクトル(図6の Fe(III))が現れている。温度変化から求めた ^{57}Mn と酸素との解離エネルギー(0.9eV)は、 β 壊変の平均反跳エネルギー(40eV)より小さいので図6の Fe_x は原子間位置に占めるFeとした¹⁵⁾。ただ、測定温度の高い異性体シフトの値からは Fe^{3+} と考えられる。そのほか、ここでは、 $^{119\text{m}}\text{In}$ ($T_{1/2}=18.0\text{m}$)/ ^{119}In ($T_{1/2}=2.4\text{m}$, 23.9keV)のイオン注入による ^{119}Sn のeMSなどが利用できる。

5. メスバウアー分光の応用研究と理論計算

~~~~~  
 今までに行ってきたメスバウアー分光の応用研究<sup>16)</sup>としては、鉄鋼表面の腐食生成物の解明、自動車鋼板のリン酸化被膜やシュウ酸被膜の状態分析、リン酸塩の熱分解生成物やリン酸塩皮膜の熱変性の解析、各種ステンレス鋼板の酸化超薄膜の解析、ステンレス鋼酸化薄膜の固体pHセンサー

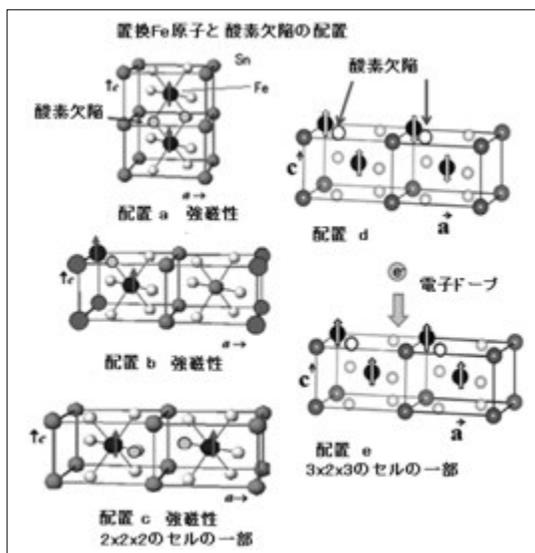


図7 酸化スズのルチル型結晶格子のSn原子サイトに置換した2Fe原子と酸素欠陥の配置による磁気モーメントの向き

への応用、酸化スズのin situ測定によるガス応答解析、メタンカップリング触媒、炭酸ガス吸収剤<sup>17)</sup>、水素吸蔵合金、センダスト(Si-Al-Fe)などの機能性材料の解析<sup>18)</sup>である。

最近、酸化チタン、酸化亜鉛および酸化スズなどバンドギャップの大きい透明半導体に遷移金属イオンをドーブすると異常な磁性が現れることが報告されている。著者らも酸化スズに着目してこれらの検証を行ってきた。理論計算の専門家の助けを借りておこなったルチル型酸化スズの単位格子の第一原理計算結果<sup>19)</sup>を紹介する。結晶内に置換した鉄原子と酸素欠陥との配置(図7)により、2つのスピン(磁気モーメント)の向きが同じ(強磁性的)にも反対(反強磁性的)にもなり得ること、小さな領域でスピンの向きがそろっていても図7の右側のように隣り合うと反強磁性的になること、また電子がドーブされると強磁性的に変わることなどが分かってきた。酸化スズにドーブした $^{57}\text{Fe}$ のメスバウアーのパラメータと計算結果の関係は、レビューとしてまとめた<sup>20)</sup>。ナノ粒子や小さなデバイスになれば表面のナノ構造や多層膜の界面の構造が物性に影響を及ぼす。酸化物の格子歪みや酸素欠陥などが関与する希薄磁性の解析には、メスバウアー核をプローブとする方法は重要なツールになるであろう。現在、非磁性の $^{119}\text{Sn}$ の核スピンは、 $^{57}\text{Fe}$ の核スピン(励起核の $I=3/2$ と基底核の $I=1/2$ )と同じなので、これを用いれば、ナノ粒子の欠陥や格子歪みに由来する希薄磁性の研究がさらに推進できると期待している。

## 6. おわりに——メスbauer-R線源と安全

~~~~~

メスbauer線源は、日本アイソトープ協会から入手するが、線源の価格が一時高騰したことがある。調べたら中間業者が入っていたためであった。そこで、ロシアから直接輸入できる道をRI協会に紹介してきた。放射光施設や加速器施設においてもメスbauerスペクトルの測定が行われるようになったが、試料などの善し悪しを確認し、良質のスペクトルを得るためには、マシンタイムの制約を受けない、身近なRI線源による測定は不可欠である。卓上のX線装置と比べてもその線源強度（照射線量）は小さく、線源の周りを数cmの厚さの鉛で覆えば放射線被ばくを十分に避けることができる。

ところが、最近、大学でも密封小線源の管理区域の設置に難色を示す風潮を見かけるのが残念である。密封小線源の管理区域は原子力発電所や大型放射線施設のような潜在危険の大きい施設の管理区域とはまったく違う。メスbauer分光器は、ECDガスクロマトグラフのようなRI装備機器に近いものであることをイメージしていただけたら幸いである。 ^{57}Co （半減期270日）、 $^{119\text{m}}\text{Sn}$ （半減期250日）などの線源は、届出で使用することも可能である。研究の役立つツールとしてメスbauer分光がさらに利用されることを願っている。

謝 辞

~~~~~

メスbauer分光を始めたのは、東京大学工学部工業分析教室（当時仁木栄次教授、氏平祐輔助教授）に入ったときからである。その後、原子力工学科・原子力国際専攻の各教授（菅野昌義、石野栞、石樽顕吉、中沢正治、田中知）のもと工学部放射線管理や放射線取扱主任者の活動をしてきた。管理する立場と使用する立場の両方を経験してきた。東京大学を去った今でも海外から共同研究の誘いが来る。今までサポートしてくださった先生方や国内外の共同研究者にこの場を借りて感謝する。

## 引用文献

- 1) 野村貴美,「現状と展開」, *RADIOISOTOPES*, 62, (2013) 53-60
- 2) 野村貴美,「ミニメスbauer分光器と火星探査」, *RADIOISOTOPES*, 63, (2014) 263-278.
- 3) *RADIOISOTOPES* 連載講座「メスbauerアスペクトロメリーの基礎と応用」の各トピックス (Vol. 62(2013)No.1からVol.64(2015)No.2)は、日本アイソトープ協会のホームページを参照、また、それらの合本は、メスbauer分光研究会(編著代表 野村貴美)より2016.3に発行
- 4) 野村貴美,「メスbauer散乱法による固体表面分析の基礎と応用」, *RADIOISOTOPES*, 63, (2014) 405-427.
- 5) 野村貴美,「希薄磁性酸化物の磁気特性とメスbauerアスペクトル」, *RADIOISOTOPES*, 62, (2013) 857-875.

- 6) K. Nomura, et al., "Characterization of  $^{57}\text{Fe}$  implanted and annealed  $\text{SnO}_2$  (3%Sb) films by depth selective conversion electron Mössbauer spectroscopy (DCEMS)". *J. Nucl. Radiochem. Sci.*, (2010)1-5.
- 7) K. Nomura, H. Reuther, "Nano particles of iron oxides in  $\text{SiO}_2$  glass prepared by ion implantation". *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 287, (2011)341-346
- 8) G. Klingelhofer, et al., "Jarosite and hematite at Meridiani Planum from Opportunities Mössbauer Spectrometer". *Science*, 306, (2004)1740-1745
- 9) K. Nomura, et al., Mössbauer studies of Jarosite, Mikasaite, Yavapaiite and implication to their Martian counterparts. *Hyperfine Interact.*, 166, (2005) 657-664.
- 10) 野村貴美,「シンクロトロン放射光を用いたメスbauerアスペクトロメトリー、II前方核共鳴散乱法」, *RADIOISOTOPES*, 52, (2003) 293-307.
- 11) 野村貴美,「シンクロトロン放射光を用いたメスbauerアスペクトロメトリー、I非弾性散乱法」, *RADIOISOTOPES*, 52, (2003) 242-256.
- 12) K.Nomura, et al., " $\text{CO}_2$  absorption properties and characterization of Perovskite oxides,  $(\text{Ba,Ca})(\text{Co,Fe})\text{O}_{3-\delta}$ ". *Appl. Cataly. A*: 137 (1996) 25-36
- 13) K.Nomura, et al., "Characterization of perovskite related oxides by nuclear resonance inelastic scattering of synchrotron radiation". *J. Radioanal. and Nucl. Chem.*, 255, (2003) 189-193.
- 14) K. Nomura, et al., "Room-temperature ferromagnetism of sol-gel-synthesized  $\text{Sn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2-\delta}$  powders". *Phys. Rev. B*, 75, (2007) 184411 (13p)
- 15) H. P. Gunnlaugsson, et al., "Characterization of Fe states in dilute  $^{57}\text{Mn}$  implanted  $\text{SnO}_2$  film", *Hyperfine Interact.*, 226, (2014) 389-396.
- 16) 野村貴美、氏平祐輔,「鉄鋼の酸化生成物と防食皮膜のメスbauer分析」, *RADIOISOTOPES*, 63, (2014) 531-558.
- 17) 野村貴美,「高温炭酸ガス高速吸収酸化物とメカニカル効果」, *金属*, 69(1999) 1072-1081.
- 18) K. Nomura, et al., "Microstructure analysis of Fe-Si-Al alloy powders and films by Mössbauer spectrometry". *J. Mater. Sci.* 29, (1994) 6019-6025.
- 19) A.M.Mudarra Navarro, et al., "Ab Initio Study of the Ferromagnetic Response, Local Structure, and Hyperfine Properties of Fe-Doped  $\text{SnO}_2$ ". *J. Phys. Chem.*, C,119, (2015) 5596.
- 20) K. Nomura, "Magnetic Properties and Oxygen Defects of Dilute Metal Doped Tin Oxide Based Semiconductor". *Croat. Chem. Acta* 88(4), (2015)579-590.

## 著者プロフィール

1952年生まれ。福島県立安積高校卒、横浜国立大学大学院工学研究科修士課程修了、東京大学工学部助手（放射線管理室）、東京大学工学博士、ドイツ・ローゼンドルフ研究所、ハンガリー・エートベス大学核化学教室（A. Vertes教授）および米国・ドレックセル大学化学教室（A. Nath教授）客員研究員、東京大学大学院工学系研究科助教授（応用化学専攻兼任）、准教授、特任准教授を経て2013年満期退職。現在、明治大学兼任講師、東京理科大学非常勤講師、同大光触媒国際研究センター博士研究員、日本放射線安全管理学会顧問、NPO放射線安全フォーラム監事。



細田 正洋\*

# アイルランド共和国・ 環境保護庁放射線防護局への滞在記

## 1. はじめに

2015年4月から2016年3月までの約1年間、アイルランド共和国ダブリン市にあるOffice of Radiological Protection, Environmental Protection Agency (環境保護庁放射線防護局、EPA-ORP) に留学する機会を得た。弘前大学では1年未満であれば長期出張によって海外留学することが可能である。過去にも数名の教員が長期出張によってフランスや米国へ1年間の留学を経験されていた。

著者は、主としてラドンや大地ガンマ線等を中心とした自然放射線及び放射能に関する研究を行っている。そこで、自身の研究の幅を広げるために、ラドンに関わる放射性核種の分析に関する新しい知識と技術を得たいと思っていた。さらに、国際会議や海外調査を通じて、英語でのコミュニケーションスキルを向上させる必要性を日頃より実感していた。そのようなことから、英語圏への留学に以前より興味を持っていた。アイルランド共和国(以降、アイルランドとする)への興味は、2007年にブラジルで開催された第8回自然放射線環境に関する国際シンポジウムに参加したことがきっかけであろう。この会議中に、本学被ばく医療総合研究所の床次眞司教授(当時は放射線医学総合研究所)からアイルランド国立大学ダブリン校(University College Dublin:UCD)のJames Mc Laughlin教授(図1)を紹介して頂いた。Mc Laughlin教授の講演は非常に明



図1 EPA-ORPでの打ち合わせの様子(左から Kelleher博士、著者、Mc Laughlin教授)。

快であり、それ以降、様々な国際会議等で話をする機会を得た。このような交流を通じて、次第にアイルランドに留学をしたい気持ちが強くなっていった。実際に1年間留学をするとすると、著者が不在中の講義や学内外の業務を調整する必要があった。そこで、関係者と十分に議論し、講義や学内外の業務を調整した上で2015年度に留学することが可能となった。

Mc Laughlin教授は既にUCDを定年退職(現在は、欧州ラドン協会理事)されていたため、アイルランド国内で唯一、環境放射能研究を行っているEPA-ORPに受け入れの可能性について打診をして頂いた。Mc Laughlin教授の紹介によって、2015年4月より1年間、客員研究員として滞在することが許可された。

EPA-ORPでは、Mc Laughlin教授のもとで博士号を取られたKevin Kelleher博士(図1)の指導のもと、飲料水中に含まれる放射性核

\* Masahiro HOSODA 国立大学法人弘前大学大学院 保健学研究科 保健学専攻 放射線技術科学領域・講師

種の放射化学分析を中心として、関連する様々な分析を行ったのでその概要を解説するとともに、アイルランドでの生活についても触れる。

## 2. アイルランドの概要

アイルランドの面積は北海道とほぼ同程度であり、全人口は約460万人でその30%程度に当たる約127万人がダブリン州に住んでいる。アイルランドは、レンスター地方、マンスター地方、コンナート地方及びアルスター地方の4つの地方で構成されており、全32州がある。ダブリンはレンスター地方にあるアイルランドの首都である。アイルランドはイギリスの植民地時代に多くの独立運動が行われたが、特に1916年のイースター蜂起が最大であった。その後の独立戦争の後にアイルランド自由国として1921年にイギリスから独立した。2016年はアイルランドにとってイースター蜂起から100周年の年であり、著者の滞在中には国内で様々なイベントが開催されていた。

ダブリンの気候は、寒くても0°Cを下回ることがない程度で、夏でも25°Cくらいであり、年間を通じて乾燥していた。Tシャツを持参したが、数回しか着ることはなかった。雪は帰国直前に一度降った程度であり、年間を通じて快適に生活することができた。雨が多い印象を持つ人が多いと思うが、著者はそれほど多いとは感じなかった。

また、6月頃になるとアイルランドにはフランスやイタリア等のヨーロッパ諸国をはじめ、中国等のアジア諸国から多くの学生が語学留学に来ていた。日本人は非常に少ないとのことであり、英会話をしっかりと勉強するのであれば、大変良い環境であると思われる。また、ヨーロッパ諸国の中でも人気の観光地の一つでもあるようで、シティセンターをはじめ多くの名所は常に観光客で賑わっていた。アイリッシュは気さくで親切な人が多いというのが著者の印象である。道で迷っていたり、乗るバスを探していたりしていると、大体誰かが声を

掛けてくれ、丁寧に説明してくれることが多く、問題なく目的地までたどり着くことができた。

## 3. EPA-ORPの概要

### 3.1 EPA-ORPの組織概要

ORPの前身であるRadiological Protection Institute of Ireland (アイルランド放射線防護研究所、RPII) は1992年に国内の放射線防護計画によって設立され、2014年8月1日にEPAに合併された。

EPA-ORPはISO17025の認定試験機関であり、International Atomic Energy Agency (国際原子力機関、IAEA) が設置したALMERA (Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity) ネットワークに参加するとともに、National Physics Laboratory (英国国立物理学研究所、NPL) やPhysikalisch Technische Bundesanstalt (ドイツ連邦物理技術研究所、PTB) 等の機関と定期的に相互比較実験を行い、分析結果の品質保証をしている。

ORPは、Radon and Radiation Measurement Program、Radiation Monitoring and Emergency Preparedness Program、Radiation Protection Regulation Programの3つのプログラムで構成され、全職員数は50名程度である。さらに、Radiation Monitoring and Emergency Preparedness Programは、Radiation Monitoring GroupとEmergency Preparedness Groupの2グループで構成されている。著者はRadiation Monitoring Groupに所属し、そこには4名の研究員と4名の技術員が働いていた。研究者と技術者らはそれぞれ分担して、水(飲料水、雨水、地下水、海水)、土壌及び堆積物、魚介類や海藻、牛乳、チーズ、食事、大気試料中のあらゆる放射性核種の分析を行っている。アイルランドでは、アイリッシュ海に面する英国・セラフィールドの火災事故による影響をモニタリングするため、定期的に海水、海藻、魚介類、堆積物をサンプリングし、放射性ストロンチウ

ムや放射性セシウム等の分析を行っている。さらに、チェルノブイリ原子力発電所事故や東京電力福島第一原子力発電所事故によって放出された放射性核種の分析も実施し、論文や報告書として公開している。

### 3.2 EPA-ORPでの分析概要

EPA-ORPには、職員の居室の他、化学実験室、放射線計測室、ラドン校正場、ガンマ線校正場がある。αスペクトロメトリのために、プレナシリコン検出器(Passivated Implanted Planer Silicon Detector : PIPS)が24個、α/β分析のためにガスフロー型比例計数管及び液体シンチレーションカウンタがそれぞれ2台ある。さらに、γ線スペクトロメトリを行うため、高純度Ge半導体検出器が7台設置されている。高純度Ge半導体検出器は今後増える予定とのことであった。著者は化学実験室及び放射線計測室を自由に使用することができ、表1に示す分析技術を習得した。

EPA-ORPでは全ての分析に対して試験手順書が作成されており、第三者による審査を受けて実際の分析に用いられている。この試験手順書は、誰でも同じ手法で同一の分析が行えるように手順が事細かく記載されており、定期的に職員による実演と審査を実施し、必要に応じて適宜更新されている。表中にTPOの番号がない分析手法は現在、試験手順書を作成しているところである。著者は、化学実験の経験が殆どなかったため、最初は戸惑いがあったものの、Kelleher博士がこれらの試験手順書をもとに化学実験の初歩から丁寧に解説してくれた。したがって、徐々にではあったも

表1 EPA-ORPの滞在期間中に行った分析手法

| EPA-ORPにおける試験方法のID | 試験内容                                                           |
|--------------------|----------------------------------------------------------------|
| TPO20              | 放射能が保証されたRI標準溶液の一次希釈                                           |
| TPO25              | 放射能が保証されたRI標準溶液の二次希釈                                           |
| TPO30              | ビベットの校正                                                        |
| TPO31              | 電子天秤の校正                                                        |
| TPO33              | メスフラスコの校正                                                      |
| TPO41              | 飲料水中のグロスアルファ・ベータ放射能の評価(ガスフローカウンタを用いた分析)                        |
| TPO46              | 液体シンチレーションカウンタの操作方法                                            |
| TPO65              | 飲料水中のラジウムの評価(バリウム共沈法)                                          |
| TPO70              | 堆積物中のプルトニウムの評価                                                 |
| TPO80              | 牛乳及び食事試料中の <sup>90</sup> Srの評価                                 |
| TPO81              | 牛乳及び食事試料中の <sup>90</sup> Srの評価<br>-イットリウム回収率-                  |
| TPO82              | 牛乳及び食事試料中の <sup>90</sup> Srの評価<br>- <sup>90</sup> Sr放射能の計算-    |
| TPO83              | 牛乳及び食事試料中の <sup>90</sup> Srの評価<br>- <sup>90</sup> Yチェレンコフ計数効率- |
| TPO97              | 飲料水中の <sup>3</sup> Hの評価                                        |
| TPO100             | 飲料水中の <sup>222</sup> Rnの評価                                     |
| —                  | 飲料水中の <sup>14</sup> Cの評価                                       |
| —                  | 飲料水中の <sup>210</sup> Poの評価                                     |
| —                  | 高純度Ge半導体検出器による飲料水中の放射性核種濃度の評価                                  |
| —                  | イオン交換樹脂を用いた海水中の <sup>137</sup> Csの評価                           |
| —                  | 飲料水中のグロスアルファ・ベータ放射能の評価のための液体シンチレーションカウンタの計数効率の評価               |
| —                  | 液体シンチレーションカウンタによる飲料水中のグロスアルファ・ベータ放射能の評価                        |

の1年間で多くの分析法を習得することができた。これらの分析手法の全てを弘前大学内で実施することは不可能であるが、可能な範囲で著者自身の研究に反映させていきたいと考えている。

### 3.3 EPA-ORPでの研究

表1に示した分析技術を用いて滞在中には2つのテーマで研究を行った。水中の<sup>226</sup>Raを評価する際にバリウム共沈法がよく用いられる。この手法によって得られた硫酸バリウムの沈殿物をフィルタ上に採取し、高純度Ge半導体検出器で測定する際の試料の封入方法について検討した。一般に、土壌試料や建材試料中の<sup>226</sup>Ra濃度を評価する際には、試料中の<sup>226</sup>Raと<sup>222</sup>Rn及びその壊変生成核種との放射平衡を成立させるために、試料を密封して30日以上静置させる。EPA-ORPで用いられている密封

手法は著者らの手法と異なったため、その違いが測定値に影響するのかを検討した。結果の詳細については、原著論文 (Hosoda et al. Radiat. Environ. Med. 2016) として報告したので省略するが、大変興味深い結果であった。

もう一つは、日本国内に広く流通しているミネラルウォーター中の天然及び人工放射性核種の分析を行った。滞在期間が1年間しかないことから、当初はダブリンの水を使って様々な放射性核種の分析技術を覚えることを目的としていた。したがって、研究として水を分析することまでは考えていなかった。しかし、帰国したら日本国内で流通しているミネラルウォーターの分析をしてみたいと思っていることをKelleher博士に話したところ、ミネラルウォーターを集めることができるのであれば、EPA-ORPで分析してもよいとの話になった。そこで、1か月遅れてダブリンに来ることになっていた妻に連絡をし、ミネラルウォーターを買い集めてもらい(合計で15L程度)、ダブリンに来る際に一緒に運んでもらった。追加のミネラルウォーターは弘前大学の辻口貴清助教に相談し、ダブリンに空輸してもらった。そのお蔭で限られた期間内に多くの核種分析をすることができた。しかし、滞在期間中に目的としていた全ての核種分析を終えることができなかったため、引き続き共同研究として進めて行くこととなった。

#### 4. ダブリンでの生活について

##### 4.1 ダブリンでのアパート探し

アイルランドは、2008年頃の経済危機によってアパートの建設がいったん止まったそうである。その結果、アパートの需要と供給のバランスが崩れ、家賃が年々上昇しているとのことである。このような状況のため、家族3人が暮らすことができるアパートを見つけるには大変苦労した。著者がダブリンに到着してから2週間は、EPA-ORPで事務官をしていたRose Timminsさんの自宅にホームステイを

させてもらった。ここにはインドからの留学生もホームステイをしており、朝食や夕食時に文化の違い等、色々話を聞くことができ非常に良い経験となった。

2週間のホームステイ間にアパートを見つける必要があった。上述のように、ダブリンでアパートを見つけることはそう簡単ではない。アイルランドのアパート探しは最大のウェブサイトであるDaft.ieを毎日欠かさずチェックすることが重要であった。よい物件を見つけると直ぐに、Mc Laughlin教授に電話をして一緒に不動産に行き、アパートの見学を行った。良い物件の場合には10名近くの見学者が居り、物件によっては見学の予約も取れないこともあった。とはいえ、二転三転あったもののMc Laughlin教授の協力により、なんとか希望するエリアのアパートを借りることができた。Mc Laughlin教授には銀行口座の開設にも協力して頂いたお蔭で、家族が合流する前に生活の準備は全て整った。

##### 4.2 ダブリンでの休日

EPA-ORPの職員の殆どが8時から9時に出勤し17時頃には帰宅し、家族との時間を最優先にしていた。著者が住んでいたアパートからEPA-ORPまでは歩いて50分くらいであり、健康管理のためにも基本的には毎日徒歩で通勤した。著者も他の職員と同様に、17時前後には研究所を出て18時前にはアパートに着くようにしていた。春から秋にかけては21時過ぎまで明るいので、仕事が終わると家族と待ち合わせをして公園でピクニックを楽しんだり、一緒に買い物をしたりした。また、休日は研究所内に入ることができないため、仕事をするようなことはなく、家族と公園に行ったり、シティセンター(図2)に食事や買い物に出かけたりすることが多かった。ダブリン市内には徒歩やバス、LUASを利用して簡単に行くことができる公園が多くあった(図3)。また、シティセンターから鉄道(DART)を利用すれば海岸沿いの街にもすぐに出ることができ、週末に時間を見つけては市内や国内観光を楽



図2 シティセンターの目抜き通りであるグラフトン通り。多くの大道芸人あらゆるところで様々なパフォーマンスをしており、歩いているだけでも飽きない。



図3 シティセンターにあるセントステーブンスグリーン。この公園には子供のための遊び場が設けられており、週末になると多くの子供たちでにぎわっていた。このような公園が市内に点在していた。

しんだ。Kelleher博士は「ダブリン市内の観光名所は恐らくMasahiroの方が詳しいだろう」と笑っていた。

EPAでは、職員のための多くのイベントが企画された。年に数回はPubでの懇親会が17時以降に開催され、著者は欠かさず参加した。他にも、職員の家族のために夏にはバーベキューが開催され、そこには子供たちのための遊び場も特別に設けられた。また、クリスマスにはクリスマスパーティが開催され、全てのイベントに家族同伴で参加することができた。これも貴重な良い経験となった。

Mc Laughlin教授やKelleher博士、居室が同じであったPaul Mc Ginnity博士（現在はIAEA

モナコ海洋環境研究所）とは家族同志の交流をすることができた。彼らは、EPA-ORPでの研究以外でも常に我々のダブリンでの滞在を気にかけてくれ、一緒に公園に出かけたり、多くのイベントに参加したり、ホームパーティを開催してくれた。彼らとの交流により、アイルランドの様々な文化を知ることができ、ダブリンでの生活を堪能することができた。

### 4.3 ゲーリックフットボールとハーリング

ゲーリックフットボールとハーリング（図4）はアイルランドの国民的人気スポーツであり、ゲーリック体育協会（Gaelic Athletic Association : GAA）によって運営されている。32の州でそれぞれのチームを持っており、定期的に試合を開催している。どちらもアマチュアスポーツであり、選手達は仕事を持っている。GARDA（アイルランドの警察）や消防署の職員であったり、医師であったり大学生等が選手として活躍しているようである。8月にはKelleher博士の招待で全国大会の準決勝（ダブリン州対メイヨー州）を観戦することができた。準決勝までは各州の球技場で試合が開催されるが、準決勝と決勝戦はヨーロッパで3番目に大きいと言われている、クローク・パーク（収容人数：82,300人）で開催され、ほぼ満員であった。著者は観戦が初めてであったが、非常に興奮する試合であった。日本ではサッカーが人気のスポーツの一つであるが、まるでワールドカップかのような盛り上がりであった。帰国直



図4 ハーリングの試合の様子。2016年3月にクロークパークで開催されたダブリン州とコーク州の試合。

前にも、Kelleher博士の企画によって職員や学生達と冬の試合を観戦した。

なお、滞在中にラグビーのワールドカップがイギリスで開催されたが、アイリッシュはゲーリックフットボールやハーリングと同様にラグビー観戦も好むようである。特に、ラグビーの試合がある時間帯は多くの人が家でテレビ観戦をするため、渋滞が緩和されるようである。

## 5. 終わりに

ダブリンでの1年間は光速のようにあっという間に過ぎた。前述のように、研究はもちろんのこと、著者は英語でのコミュニケーション能力の向上を目指した。そこで、研究所ではできる限り職員同士の話に耳を傾け、時間があれば多くの職員に話かけるようにした。大分業務の邪魔をしたことだろうと思う。特に、10時30分からのCoffee timeは貴重な時間であった。アイリッシュ同志の会話を理解するのは正直なところ1年間では容易ではなかったが、聞き取りは多少慣れたのかもしれない。

皆忙しく業務をしている中で些細な疑問にも丁寧に対応してくれた。そのお蔭で、初めての化学実験であったのにも拘らず、1年間で多くの知識や技術を身に着けることができた。また、金曜日になると多くの職員から週末のお勧めイベントの情報がメールで送られてきた。著者らはこれらの情報をもとに、時間がいくらあっても足りないくらい充実した毎日を楽しんだ。最終日には、1年間のアイルランドでの生活を総括したプレゼンテーション後、放射線モニタリンググループのメンバーが送別会をしてくれた(図5)。アイリッシュランチと会話を楽しみつつ、1年間の思い出を語った。

このような充実した生活を送ることができたのもMc Laughlin教授夫妻やRoseさん、Kelleher博士やMc Ginnity博士及び彼らの家族、そしてORPの職員の方々のお蔭であると感謝している。また、1年間の長期出張の機会を与えてくれた、弘前大学の多くの方々に感謝して



図5 放射線モニタリンググループで開催してくれた送別会の様子。グループリーダーのLorraine Curvivan氏(右の上から2人目)は怪我で休暇中であったのにも関わらず出席してくれた。

いる。特に、副学長の柏倉幾郎教授と放射線技術科学領域代表の細川洋一郎教授には長期出張に際して多くの相談をさせて頂いた。また、床次眞司教授には留学に際し、ご自身の経験も踏まえ多くのアドバイスを頂いた。被ばく医療総合研究所の岩岡和輝助教には多くの研究資料を電子メールで提供して頂いた。医学研究科の松谷秀哉講師及び保健学研究科の工藤幸清准教授には著者の不在中の講義を担当して頂いた。保健学研究科生体応答科学研究センター(代表：中村敏也教授)からは著者の渡航費を出して頂いた。紙面の関係上、ここに全員の名前を挙げることはできないが、多くの方々のお蔭でアイルランドに留学することができ、大変充実した1年間を送ることができた。ここに記して感謝の意を表します。

今後は、この1年間で得た経験をどのように生かしていくのかゆっくりと考えていきたい。

### 著者プロフィール

1974年静岡県浜松市出身。国立大学法人弘前大学大学院保健学研究科講師。1998年岐阜医療技術短期大学卒業。2007年東京都立保健科学大学院博士課程修了。博士(保健科学)。中央医療技術専門学校専任教員、放射線医学総合研究所放射線防護研究センター博士研究員を経て、2011年2月より国立大学法人弘前大学大学院保健学研究科。研究テーマは環境中の放射線及び放射能の計測、動態評価及び線量評価。

《お知らせ》

## 平成28年度放射線安全取扱部会年次大会 (第57回放射線管理研修会)

平成28年度年次大会は、テーマを「いいね鎌倉 - 主任者よ立ち上がれ-」として、鎌倉市で開催いたします。多くの皆様のご参加をお待ち申し上げます。

開催日：平成28年11月10日(木)、11日(金)

会場：鎌倉芸術館小ホール（鎌倉市大船六丁目1-2）JR大船駅東口より徒歩約10分

交流会：鎌倉芸術館集会室

参加費：事前登録 6,000円 当日登録 7,000円

交流会事前登録 5,000円 当日登録 6,000円

学生は事前登録のみで各2,000円

詳しくはホームページ (<http://www.jrias.or.jp>) をご確認ください。

### プログラム概要 (予定)

#### ◆ 1日目 [11月10日(木) 受付9:30~]

\* 特別講演 I 「放射線安全管理行政の動向」  
(原子力規制庁)

\* ポスター発表・相談コーナー

\* シンポジウム I 「放射線利用の品質保証制度導入  
にむけて」

\* 交流会

この他に機器展示、書籍コーナーを予定しています。

#### ◆ 2日目 [11月11日(金) 受付9:10~]

\* 特別セッション 「高校生による放射線研究発表」(一般公開)

\* 特別講演 II 「113番新元素二ホニウムの発見」(一般公開)

\* シンポジウム II 「最先端のガン治療と研究」(一般公開)

\* 私の意見・支部の意見

\* 大会まとめ・次回大会紹介・閉会

【連絡先】：放射線安全取扱部会事務局 日本アイソトープ協会学術振興部学術課

〒113-8941 東京都文京区本駒込2-28-45

Tel. 03-5395-8081 Fax. 03-5395-8053 E-mail: [gakujutsu@jrias.or.jp](mailto:gakujutsu@jrias.or.jp)

## 編集後記

● 今月号は巻頭に（公財）原子力安全研究協会の杉浦理事長より、「「原子力の日」に思う」と題して執筆いただきました。（公財）原子力安全研究協会は、「福島県内における住民の個人被ばく線量把握」や「放射線影響に関する相談員の支援拠点」などの事業に尽力しています。

● 早川信博先生からは、国際規則における放射性核種ごとの防護上の制限値の導入方法に関する日本保健物理学会・専門研究会の成果を寄稿いただきました。想定シナリオは、私どもの生活からの経路が明示されていて、興味深く読ませていただきました。

● 野村貴美先生から寄稿いただいたメスバウアーに興味をお持ちの方は、「メスバウアー分光研究会」で検索し、HPをご覧ください。シンポジウムなどの情報が掲載されています。

● 細田正洋先生からは、アイルランドの滞在記を寄稿いただきました。ミネラルウォーターの核種分析は、またの機会にFBNewsで紹介いただければ幸いです。

● 次号は、日本経済新聞や週刊新潮でコラムを連載している東京大学の中川恵一先生や、全国中学校理科教育研究会顧問の高島勇二先生に寄稿いただく予定です。次号もご期待ください。

● さて、今年度は春先の熊本・大分を震源とする地震にはじまり、夏には大規模・広範囲に渡る水害に見舞われた日本ですが、皆様お変わりございませんでしょうか。被災された皆様には、心よりお見舞い申し上げますとともに、一日も早い復旧をお祈りいたします。

(根岸公一郎)

## FBNews No.478

発行日／平成28年10月1日

発行人／山口和彦

編集委員／今井盟 根岸公一郎 中村尚司 金子正人 加藤和明 青山伸 河村弘

谷口和史 岩井淳 川口桃子 小口靖弘 高橋英典 高羽百合子 堀口亜由美

発行所／株式会社千代田テクノ

所在地／〒113-8681 東京都文京区湯島1-7-12 千代田御茶の水ビル

電話／03-3816-5210 FAX／03-5803-4890

<http://www.c-technol.co.jp/>

印刷／株式会社テクノサポートシステム

— 禁無断転載 — 定価400円 (本体371円)