

特集 日本放射化学会ロードマップの策定

日本放射化学会ロードマップの策定について

日本放射化学会会長 篠原 厚

(大阪大学大学院理学研究科)

日本放射化学会では、現在、法人化に向け徐々に手続きを進めており、4月1日から正式に新法人としてスタートします。我々の分野のベースとなる新たな学会には、その分野の教育研究にビジョンが必要で、分野としての将来構想を持っておくべきと思っています。私が、新法人に新風を吹き込み、ビジョンを描く仕掛けとして期待しているのが、本特集でご紹介する「ロードマップ」です。

放射化学は、分野によってかなり色合いも異なり、ひとまとめにした将来構想などはなかなか難しいと思います。また、全員がゴールに向けて一丸となって進みましょう、などと言うモノでは当然ありません。学会が、先生方が学生に自分の夢を語った後に、我々の分野ではこういうビジョンを、夢を持っているということを示せる場になればいいと思います。そのロードマップは、当然どんどん変わるものです。毎年のように皆さんで書き換えてゆくような雰囲気こそが必要です。

このロードマップ作製の取り組みは、ご存じの通り、学会創設20周年の記念事業の一つとして一昨年(2019年度)のいわきでの第63回討論会から始まっています。まずは、分科会を軸にして4分野(核化学、放射化分析、核プローブ、環境)と教育の5チームを立ち上げました。以下に、そのコンセプトとワーキンググループ(WG)メンバーを紹介します。WGの世話人は理事の中から、私の一存で各分野に通じる方をお願いし、足掛け2年間にわたり検討を行っていただきました。

コンセプト

- 放射化学の未来を見据えた研究テーマの推移と予想
- 現在-5年(短期)、5-20年(中期)、20-30(50)年(長期、未来)

- 網羅的にする必要はない、新しい分野創出を含める、他分野との連携融合

WGメンバー(順不同)

核化学 WG: 塚田和明(前半の世話人)、羽場宏光(後半の世話人)、笠松良崇、鷺山幸

信、渡邊雅之、後藤真一、佐藤哲也

放射化分析 WG: 高宮幸一(世話人)、松尾基之、大浦泰嗣、三浦 勉、藤 暢輔、菊永英寿、松江秀明

核プローブ WG: 佐藤 渉(世話人)、山田康洋、久保謙哉、木野康志

環境 WG: 別所光太郎(世話人)、高橋嘉夫、田上恵子、坂口 綾、佐藤志彦

教育 WG: 篠原 厚(世話人)、海老原充、葉袋佳孝、工藤久昭、横山明彦

いわきの討論会では、記念セッションとして各分野から検討状況のトークがあり、パネル討論「放射化学の未来を考える」を開きました。そこで出た意見も踏まえ、さらに検討を重ね、前回の第64回討論会で、法人化記念セッションとして、各分野のロードマップを披露し、内容についての講演に続き、パネル討論「放射化学の未来を考える part-2」を行いました。その際のいろいろな意見交換は、我々の分野や学会について考える良い機会になったのではないかと思います。その中でも出ました、このロードマップをどうするか?、どう生かすか?放射化学会としての全体のロードマップを作らないのか?という課題について、その後、世話人中心に検討を続けています。現時点で出ている方針は、各分野のロードマップの公表の方法、学会として公開できる全体のロードマップの策定、活用案(まだ検討中)についてなどです。以下に簡単にまとめます。

- 現ロードマップは、あくまで分科会の有志で策定したものであり、討論会で披露し意見交換したが、一般公開についてのコンセンサスを得るプロセスは経ていない。そのため、一般に広く公表するには支障がある。
- ロードマップの有効利用を考えても、何らかの形で公表することには意味がある。そこで、「放射化学」に記事（本特集）として紹介することとする。（これによりロードマップだけ独り歩きするリスクを避け、経緯や責任の範囲を理解の上で利用してもらう。）
- 学会としてのロードマップを各分野のロードマップを元に策定する。作業は世話人が中心となり進める。また、このロードマップは、会員からのいわゆるパブリックコメントを得る期間を設けるなど、公表についてのコンセンサスを得るプロセスを経るようにする。
- 可能なら、新法人となって最初の討論会である第65回討論会で披露する。更新のシステム、有効活用の検討を常時行うこととする。

ロードマップの活用については、まだまだアイデア募集中と言ったところです。まずは、会員の皆様自身のモノとして、我々の分野の紹介や会員間の交流の切っ掛けに活用いただき、さらに学生

に夢を語る際のネタの一つにしていれば、その役目の半分以上は果たせたと思います。そのうえで、学会や学問分野のビジョンを示すものとして、予算獲得の資料や国へのアピールが必要な際の資料に使うことが考えられます。大きなプロジェクトを実現しようとする場合や学問の方向を国の施策に反映させたい場合など、学会にもある程度の政治的機能は必要です。その際、組織としてコンセンサスの取れた内容を持っている必要があります。また、以前から掲げているもう一つの施策、他学会との連携の際にも重要な資料となります。さらに、近々検討すべきと考えているのは、日本学術会議が3年ごとに更新している大型研究のマスタープランの策定への取組ですが、ロードマップが重要な役割を果たすと思います。また、白書を作ろうという提案もあります。

ロードマップに我々の分野の夢を語ってもらいますが、夢は実現するためにあります。我々の新法人日本放射化学会を、夢をリアルにする場の一つとして機能させましょう。

最後に、ロードマップの検討・作成にご尽力頂きましたWGメンバーの皆様、そして世話人役をお引き受け頂き、今なお検討を続けている担当理事の皆様に、（まだWGは続きますが）感謝申し上げます。

特集

放射化学教育人材育成ロードマップ

海老原 充¹、工藤 久昭²、薬袋 佳孝³、横山 明彦⁴、篠原 厚⁵
 (早稲田大理工¹、新潟大自然科学系²、武蔵大人文・根津化研³、
 金沢大理工⁴、阪大院理⁵)

教育にロードマップは少しそぐわない感もあるが、今後の放射化学教育に関する展望ということで、放射化学を取り巻く状況と、それに対応する方策について議論した。

放射化学のアカデミックな状況として、全国的な放射化学研究室の減少に伴い、関連する教育の機会減少が懸念されているにもかかわらず、一方では、福島第一原子力発電所の事故以降は特に、放射能汚染モニタリングや廃炉に関係する放射化学技術や研究者の必要性が叫ばれている。放射化学のソサエティーとしては専門家集団としての現状分析、対策、将来への指針の提供が必要と考える。可能なら学会で部会を設け、継続的な活動を展開し、下記のような項目について、議論を始めるべきである。

1. 現状分析
2. 教育コンテンツの集積・情報提供・開発
3. 若手・中堅への支援
4. アウトリーチ活動

その準備段階として、ワーキンググループの作業として、以下に述べるいくつかの事柄を検討した。

1. 中等教育の状況

現在の学習指導要領は次のような項目で、放射線・放射能についての教育が企画されている。その概要を示す。

中学理科

[第1分野]：「エネルギー」、「粒子」

第3学年に加えて、第2学年においても、放射線に関する内容を扱うこと

- 第2学年 [電流] 静電気と電流 (電子、放射線を含む)

(放射線に関する内容) 真空放電と関連させて X線にも触れるとともに、X線と同じように透過性などの性質をもつ放射線が存在し、医療や製造業などで利用されていることにも触れる。

- 第3学年 [エネルギーと物質] エネルギーとエネルギー資源 (放射線を含む)

(放射線に関する内容) 原子力発電では、ウランなどの核燃料からエネルギーを取り出していることに触れる。放射線については、核燃料から出ていたり、自然界にも存在し、地中や空気中の物質から出ていたり、宇宙から降り注いでいたりすることなどにも触れる。東日本大震災以降、社会において、放射線に対する不安が生じたり、関心が高まったりする中、理科においては、放射線について科学的に理解することが重要であり、放射線に関する学習を通して、生徒たちが自ら思考し、判断する力を育成することにもつながると考えられる。

高校

[物理基礎] エネルギーとその利用

(放射線に関する内容) 人類が利用可能な水力、化石燃料、原子力、太陽光などを源とするエネルギーの特性や利用などについて、物理学的な視点から理解すること。「原子力」については、関連して放射線及び原子力の利用とその安全性の問題にも触れること。関連して、 α 線、 β 線、 γ 線、中性子線などの放射線の特徴と利用、線量の単位など、放射線及び原子力の利用とその安全性の問題にも触れる。その際、放射線がその性質に応じて、医療、工業、農業などで利用されていることに触れることが考えられる。

[物理] 原子と原子核

(放射線に関する内容) 原子核の構成、原子核

の崩壊及び核反応について理解させることがねらいである。原子核の構成、原子核の崩壊、半減期、核分裂、核融合、原子核反応を扱い、質量とエネルギーの等価性にも触れる。例えば、放射線計測、霧箱を用いた放射線の観察などを行うことが考えられる。

[化学基礎] 物質の構成

(放射線に関する内容) [原子の構造] で原子番号、質量数及び同位体を扱うこと。その際、放射性同位体とその利用にも触れること。放射性同位体については、例えば、年代測定や医療などの利用方法に触れる。

[化学] (該当無し)

その他に、文部科学省発行の「放射線副読本」平成30年9月が存在し、小学生用は24ページ、中・高生用は24ページの分量がある。

放射線についての教育が一応にでもされていることには、胸をなでおろす気持ちであるが、[化学]には放射線の項目はなく、放射化学の立場からは複雑である。また、実際にどのくらい利用されているか、また教える側の先生がどの程度の知識があるかは不明である。あるアンケートによると大半の学校で放射線の授業を行ったという結果があるが、その教育を経てきた大学生を見ると、とてもそうとは思えないのが現状である。教員のスキルアップを含め、アカデミアや学会が貢献できる(すべき)ことは多くあると思われる。

2. 若手・中堅の活動の支援

学生や若手研究者への学習機会の提供は焦眉の急であるが、そのほかにも若手の会への支援、夏の学校などの短期セミナーへの支援、若手や中堅を対象とした新企画への支援、放射化学分野のキャリアパス情報の提供も必要であろう。また、他分野を含む学生の関心を高めることもソサエティを広げていくには必要で、関連分野を含むポスト情報の共有や大学共同利用や研大連携への支援も期待されるところである。同様の課題への学会の関与の例として日本地球化学会での活動を参考にした。同学会では十数年前から学会員のボラ

ンティア活動として、講師として派遣できるメンバーを募って登録し、所属、講演テーマ(実験も含む)などを公開しており、また主な対象を高校としているが、広範囲のニーズに対応できる講師派遣を、学会が窓口となって斡旋している。

3. オンラインコンテンツ：ねらいと考え方

昨今のコロナ禍でオンライン教育がクローズアップされているが、今後はオンラインでの様々な教育活動がさらに一般化されると思われる。教育コンテンツの保存・継承・共有および情報共有による新規コンテンツの開発促進は、これらコンテンツのオンライン化によって、より現実的なものとなっている。一方、科学基盤教育としての放射化学の必要性は広範な分野・対象・目的に及ぶものの、その教育を担うべき人材やポストは不足している。この状況を打開するには、放射化学に関する優良なる教育コンテンツを広く公開し、他領域の基盤教育にも必須な領域であることを認識させる必要がある。また、放射化学の今後を担う世代に対しても、現在に至るまでの放射化学の叡智を出身の大学・学部・専門分野の違いを越えて継承することに繋がる訳で、資する所は大きい。このような目的のために、分野別(化学系、工学系、生物系、医歯薬系など)、対象・目的別(大学院レベル、学部専門教育、学部教養教育、初等中等教育、市民教育)のニーズにきめ細かく対応した視聴覚コンテンツ(実習に関するものを含む)並びに文書型コンテンツのオンライン提供サービスについて実施に向けての具体的な検討を開始する。

4. オンラインコンテンツ：具体例

検討すべきオンラインコンテンツの具体例として対象別に列挙する。各研究教育機関あるいは研究者がそれぞれに創り上げて来たコンテンツをベースとする。学会提供のオンラインコンテンツとすることで、研究室の世代交代やミッションの転換に伴う教育資産の散逸を防ぐとともに、次世代の学会員による継承をより容易なものとする。もちろん、新たな学会独自のコンテンツの提供も重要である。

a. 大学院生(分野外の学生も含む)

研究レベルでの実験技術の習得(加速器や原

子炉についての知識など)の「講習会」。
 関連分野を含む知識についての「セミナー」。
 授業(実験コンテンツも含む)、集中講義、セミナーなどの共有

b. 学部学生

放射化学の基礎(化学史も含む)についての授業(実験コンテンツも含む)の共有。化学専門教育における重要性を再確認することも検討プロセスで重要である。

c. 文系を含む他分野の学生、中高生、一般市民
 FDNPPなどを契機とした教育資産の活用。放射能関連の一般的な知識を普及することに加えて、放射化学の歴史-過去・現在・未来についての関心につながるようなコンテンツを提供したい。

5. 関連学会との関係

関連学会との連携は学会全体の大きな課題であ

り、法人化を機に、連携を積極的に進める方向である。具体的に取り組みやすい内容として、若手人材の交流や人材育成での協力、シンポジウムや学会などの行事の共同開催が挙げられる。

放射化学会では、すでに若手の他学会での発表に対して学会からのサポート(個人ベース)を行ってきた。今後、関連学協会と連携して、放射線教育コンソーシアムを構築し、研究会など共同開催や、学会(当学会の討論会)を、まずは、同一日時、同一開催場所で行い、相互に参加費を優遇し、共通セッション(特別講演を含む)や共通懇親会を実施することなどから始めることが現実的である。

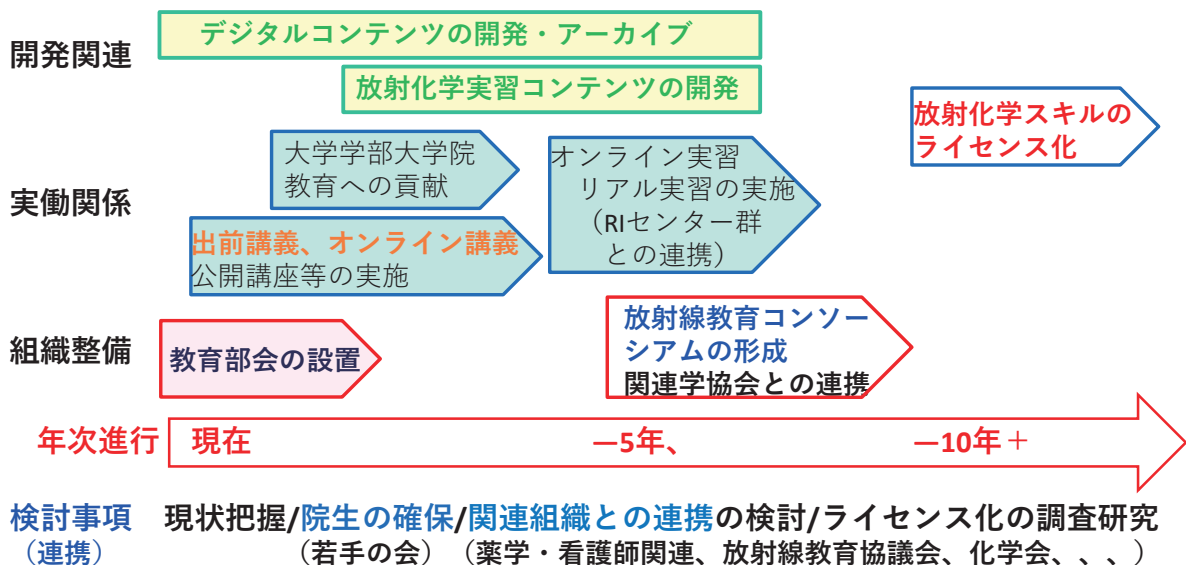
また、国際組織に対しては、APSORCを通じた国際学会との連携(開催、共催)やPACIFICHEMにおけるセッション提案、実施を行ってきたが、今後は中国や韓国の放射化学関連学会との連携を強め、MOU取り交わしによる年会での特別セッ

教育・人材育成のロードマップ

理念：学会として貢献できる教育人材育成、中立の立場による情報発信

対象：会員・学生、学校(教育・生徒)、市民、関連業界

課題：教育資源(人的、経済的)、学会外(国内外)組織・との連携



ション設定、“アジア放射化学連合”の設立など積極的な交流を目指したい。

6. その他の課題

その他の課題として、後継者育成としての大学院教育、放射化学スキルのライセンス化、リアル実験とオンライン実験のコンビネーション、国際協力、科学技術リテラシーとしての放射化学、放射化学の展開の歴史についての取り組みも考えられる。これらは、オンラインコンテンツの提供などの具体的な学会サービスの検討の対象でもある。

7. ワーキンググループからの提案

以上の放射化学教育に関する課題や将来計画を進めるにあたって、日本放射化学会に教育部会の

設置が望ましい。部会を中心に、放射化学（専門）教育、放射化学人材育成に取り組んで、現状の放射化学の教育機会減少を打破してほしい。講師派遣、オンライン授業の提供、オンラインコンテンツの開発提供、Webでの情報の公開、教材開発を実施し、またアカデミア人材の発掘については若手の会と共同で対応できれば言うことはない。また、放射線教育・アウトリーチ活動として、放射化学の専門家に対する社会のニーズに応え、放射能・放射線の正しい認識により、風評被害を回避し、市民向け、小中高校向けの啓発活動（講演会、講座等）や教養教育を実践し、ニーズ調査をして医療薬学等人材への教育も行えないだろうか。薬学、看護師業界、産業界へ講師派遣し、オンライン授業の提供を行うことも視野に入れてほしい。

特集

核化学ロードマップ

羽場 宏光¹、笠松 良崇²、後藤 真一³、佐藤 哲也⁴、塚田 和明⁴、鷲山 幸信⁵、渡邊 雅之⁶
 (理化学研究所仁科加速器科学研究センター¹、大阪大学理学研究科²、新潟大学自然科学系³、
 日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター⁴、福島県立医科大学先端臨床研究センター⁵
 日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究センター⁶)

2019年、日本放射化学会設立20周年の節目にあたり、著者らは核化学ロードマップ作成ワーキンググループを結成し、今後50年の核化学分野の在り方について討論した。その内容を核化学ロードマップ(暫定版)として、2019年9月、日本放射化学会第63回討論会(2019)「20周年記念パネル討論会～放射化学の未来を考える～」において公開し、学会員に意見を求めた。著者らはその後も核化学ロードマップの改定を続け、2020年9月、日本放射化学会第64回討論会(2020)「学会法人化特別セッション」において、核化学ロードマップ2020として公開した。本稿では、作成した核化学ロードマップ2020の概要を紹介する。

核化学とは、「原子核の壊変や原子核反応が伴った化学研究分野」である。具体的には、新元素・新同位体の探索、放射性元素(特に重・超重元素)の化学、原子核構造、原子核壊変、原子核反応、原子核分裂の研究等である。核化学の使命は、元素周期表と核図表を拡大するとともに、物質の構成要素である原子・原子核の特性を究極的に理解し、得られた知見を多分野に波及させて新しい応用を開拓することにある。

核化学は、未発見のものを含めた全ての元素と同位体を研究対象にすることができる。この点において、核化学は化学のみならず、科学の“核”となり得る研究分野といえよう。図1に核化学の

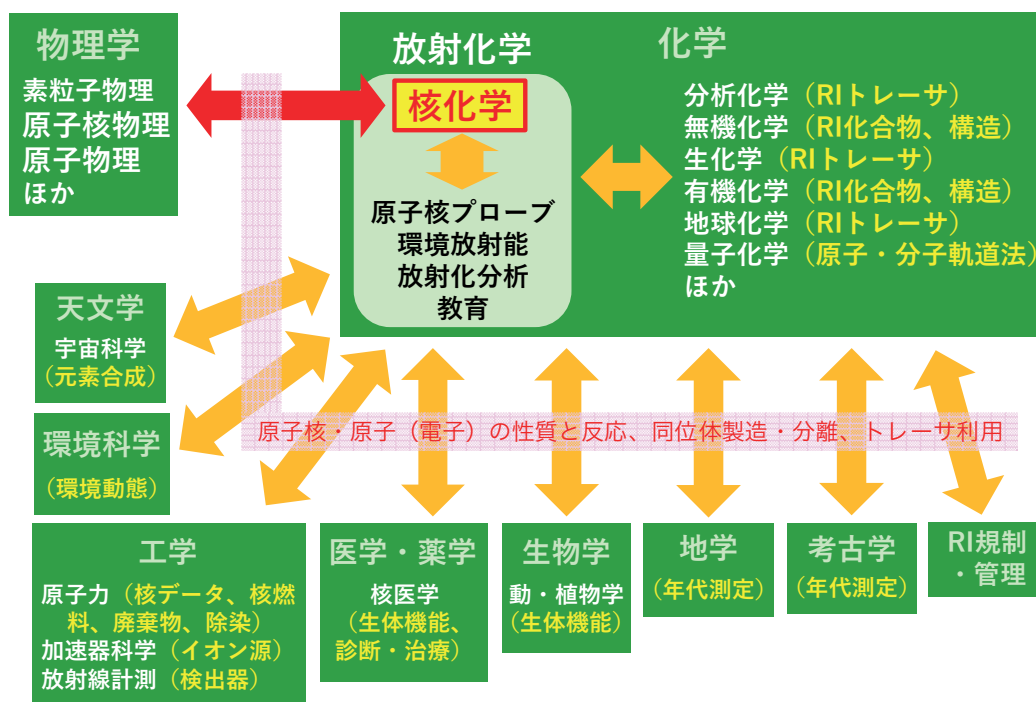


図1. 核化学の他分野との繋がり

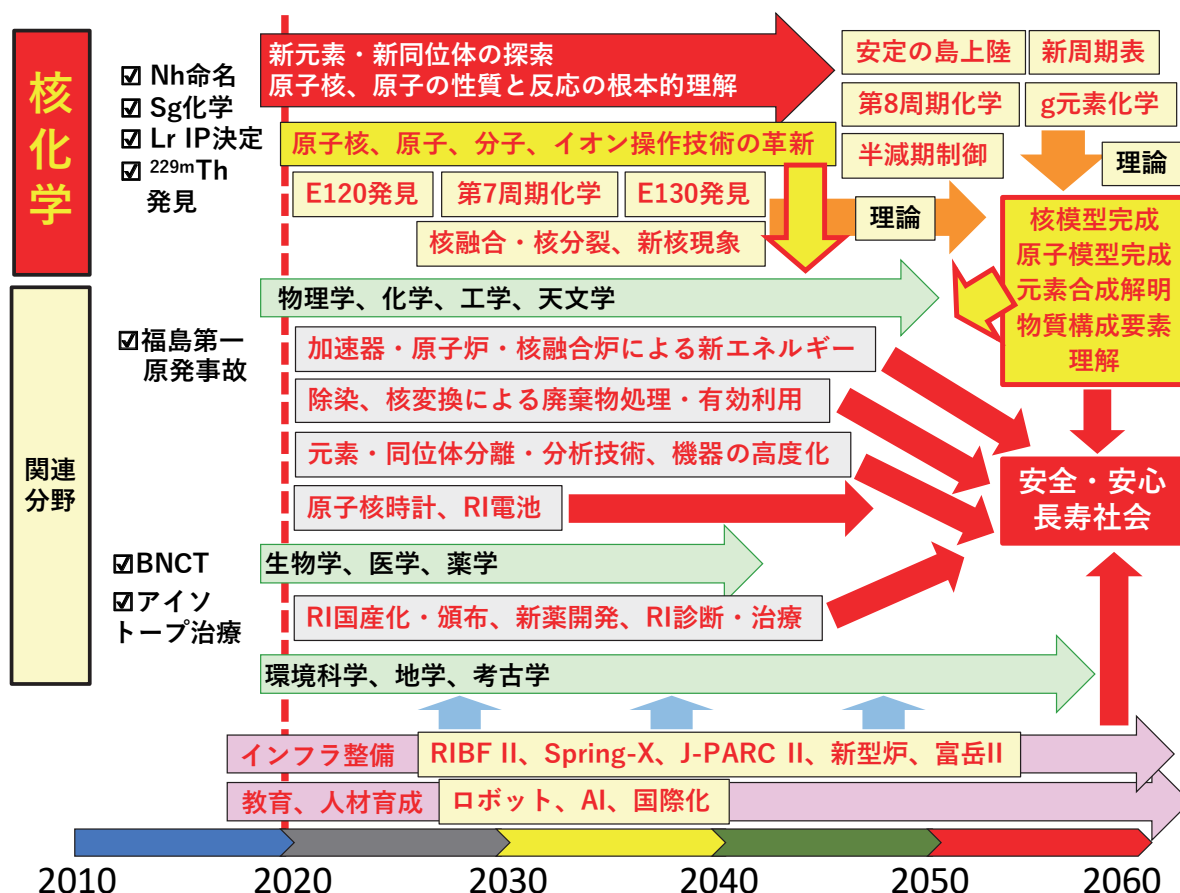


図2. 核化学ロードマップ2020

他分野との関係を示した。核化学は、原子核壊変や原子核反応を利用するため、物理学、特に原子核物理学と原子物理学に関係が深い。さらに、原子核・原子（電子）の性質と反応、同位体製造・分離、トレーサ利用を通じて、放射化学の他の分野（原子核プローブ、環境放射能、放射化分析、教育）のみならず、分析化学、無機化学、生化学、有機化学、地球化学、量子化学等、化学の広い分野と密接に関係する。さらに、天文学、環境科学、工学、医学、薬学、生物学、地学、考古学、RIの規制・管理に至るまで、他分野との繋がりには多岐にわたる。

図2に、核化学ロードマップ2020を示す。一図に多量の情報を盛り込んだため、横軸の年代スケールは粗い尺度と考えていただきたい。2010年代、日本放射化学会の核化学研究者が貢献して、アジア初・日本発の新元素ニホニウムの発見^[1]、106番超微量元素シーボーギウムのカルボニル錯体

の化学合成^[2]、103番元素ローレンシウムのイオン化ポテンシャルの決定^[3]、トリウム 229m の人工的生成^[4]等、特筆すべき成果が多数上がった。今後50年においても、新元素・新同位体の探索、原子核・原子の性質と反応の解明が核化学の基軸となっていくであろう。これを実現するためには、理化学研究所RIビームファクトリー、日本原子力研究開発機構タンデム加速器施設、大阪大学核物理研究センター等、我が国が世界に誇る最先端の加速器施設を駆使し、さらにこれらの施設の高度化を進めていくことが重要である。今後、より短寿命で希少な元素と同位体を研究対象としていくためには、原子核、原子、分子、イオンを生成・分離・検出する革新的技術の開発も必要不可欠である。

核化学分野の近い未来のマイルストーンとして、119番以降の新元素の発見、第7周期元素の化学、核融合・核分裂機構の解明、新核現象の発

周期	族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	電子軌道
1		H																	He	1s
2		Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	2s2p
3		Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	3s3p
4		K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	4s3d4p
5		Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	5s4d5p
6		Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	6s5d6p
7		Fr	Ra	†	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og	7s6d7p
8		119	120	‡	156	157	158	159	160	161	162	163	164	139	140	169	170	171	172	8s7d8p
9		165	166											167	168					9s9p
*ランタノイド	6	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71				4f
†アクチノイド	7	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103				5f
‡スーパー アクチノイド	8	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155				6f
‡スーパー アクチノイド	8	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	5g

図 3. 拡張周期表

見を、さらに未来のマイルストーンとして、原子核の安定の島への上陸、第 8 周期元素の化学、半減期制御等を掲げた。核化学が探求する原子核・原子の基本的性質の理解は、究極的な原子核・原子模型の完成や、宇宙での元素合成過程の解明に繋がるだけでなく、新しい応用を切り拓く基盤となることはいうまでもない。

2021 年、福島第一原子力発電所事故から丸 10 年を迎える。この事故は、放射化学に大きな影響を与えてきた。核化学の今後 50 年にも少なからず影響を与え続けるだろう。核化学は、物理学、化学、工学等、他分野と協力し、加速器・原子炉・核融合炉等を利用した新エネルギー源の実現、使用済み核燃料からの有用核種の回収、福島周辺の除染、核変換による廃棄物の処理への貢献が期待される。さらに、元素・同位体分離・分析技術、分析機器の高度化、原子核時計、RI 電池等の実現に核化学が果たすべき役割は大きい。一方、生物学、医学、薬学分野では、ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT: Boron Neutron Capture Therapy) が

普及し、2010 年代には、アイソトープ治療、特にアルファ放射体を用いた核医学治療が大きな注目を浴びた。有用 RI 国産化・頒布、新薬開発、地方やへき地での RI 診断・治療を実現させる上で、核化学が果たすべき使命は大きい。

2021 年 1 月現在、水素から 118 番元素オガネソンまで 118 種の元素が知られ、元素周期表の第 7 周期が完成している。元素は 173 番元素くらいまで存在すると予測され、一例として図 3 に示した拡張周期表が提案されている^[5]。一方、原子核は約 10,000 種あると予測され、人類はその 3 分の 1 程度に手が届いたに過ぎない (図 4)。今後 50 年、核化学は引き続き周期表と核図表を拡大し、物質を構成する原子・原子核の究極的理解を目指すべきであろう。この過程で得られた知見と技術は、確実に社会に還元され、安全・安心・長寿社会の実現に繋がっていくと著者らは確信している。

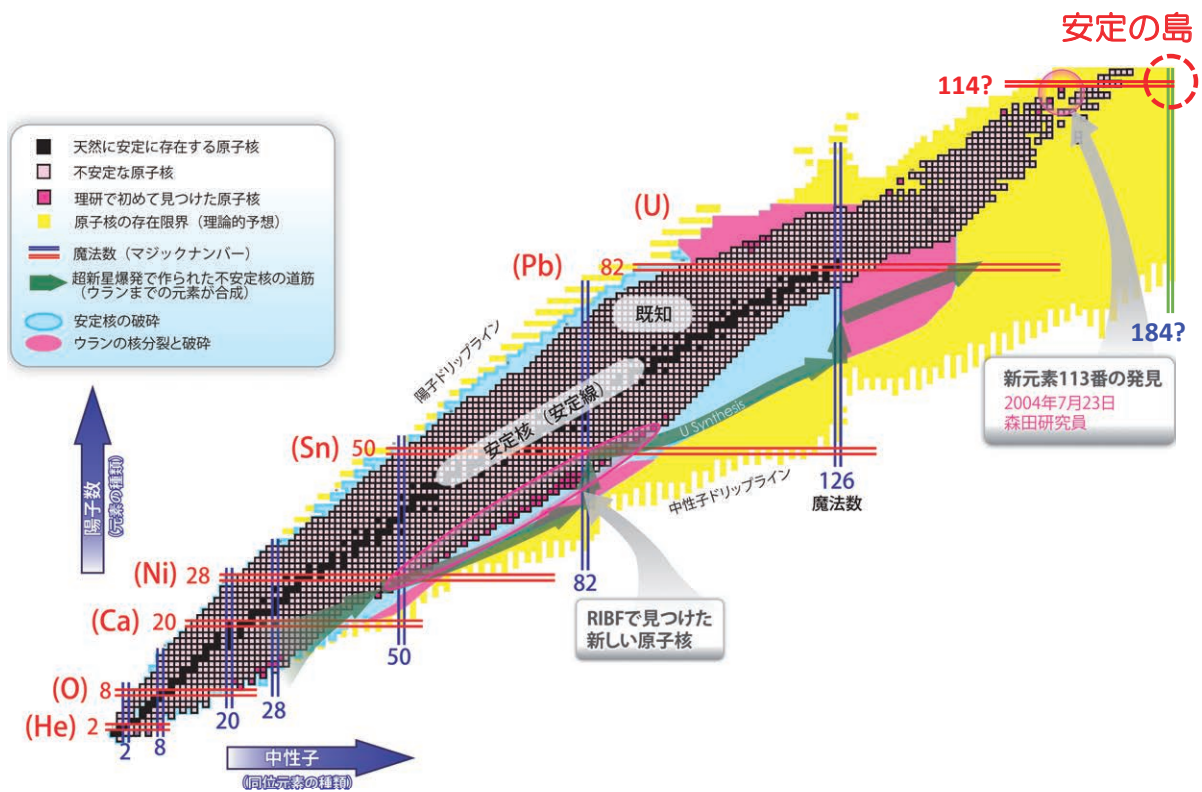


図4. 核図表 (理化学研究所 提供)

参考文献

- [1] L. Öhrström and J. Reedijk, *Pure Appl. Chem.* **88**, 1225–1229 (2016).
- [2] J. Even et al., *Science* **345**, 1491–1493 (2014).
- [3] T. K. Sato et al., *Nature* **520**, 209–211 (2015).
- [4] T. Masuda et al., *Nature* **573**, 238–242 (2019).
- [5] P. Schwerdtfeger, O. R. Smits, and P. Pyykkö, *Nat. Rev. Chem.* **4**, 359–380 (2020).

特集

放射化分析研究のロードマップ

大浦 泰嗣¹、菊永 英寿²、高宮 幸一³、藤 暢輔⁴、松江 秀明⁴、
松尾 基之⁵、三浦 勉⁶

(¹都立大、²東北大、³京都大、⁴JAEA、⁵東京大、⁶産総研)

1. 放射化分析研究の現状

放射化分析法とは、対象とする試料に中性子、光子、荷電粒子を照射することにより、試料内に含まれる原子核が原子核反応を起こし、その結果として生成する放射性核種から放出される放射線を測定することで、元素の定性、定量を行う分析法である。核反応は試料の化学状態に依存しないため、定量値は分析目的となる元素の存在状態に影響されない。また、一般的には透過能力の高いガンマ線の測定によって分析を行うため、試料を分解・溶解することなく全量分析が可能である。これらの特徴から、分析におけるトレーサビリティの確立が容易であり、特にハロゲン等の揮発性元素、溶液化が難しい貴金属元素の定量に有効な分析手法である。このため、国際度量衡委員会物質諮問委員会において正確な分析法として認知されている。代表的な放射化分析法の適用例としては、(1) 試料の完全分解が困難な土壌、鉱物、岩石、隕石、セラミックス、(2) 水素、炭素、窒素、酸素が主成分である植物などの生物試料、(3) 試料の溶液化を行う際のわずかな不純物の混入が分析精度を左右する半導体材料などの超高純度物質や宇宙塵・大気浮遊塵といった極微量試料、また(4) 認証標準物質、科学捜査、美術・考古学試料などの正確な値付けが必要な試料の元素分析などがある。

放射化分析は一般的な化学分析と異なり特殊な施設を用いる必要があり、国内では原子炉中性子による放射化分析や即発γ線分析(PGA)では、京都大学複合原子力科学研究所のKURと日本原子力研究開発機構のJRR-3(2020年度運転再開予定)が、加速器中性子によるPGAにはJ-PARC物質・生命科学研究所のANNRI、光子による放射化分析には東北大電子光物理学研究センターと

京都大学複合原子力科学研究所のLINACなどが主に利用されている。これらの施設で放射化分析法を用いて行われた分析や分析手法開発の代表例として、KURにおける(1)探査機「はやぶさ」が小惑星イトカワから回収した微粒子の元素分析(Ebihara et al., Science 2011, 333, 1119-1121)、(2)化学分離を併用した中性子放射化分析法による岩石試料中の微量ハロゲンの精密定量(Sekimoto & Ebihara, Anal. Chem. 2013, 85, 13, 6336-6341)、J-PARCのANNRIでの(3)J-PARC加速器中性子源を用いた即発ガンマ線分析法と中性子飛行時間法の融合(Toh et al., Anal. Chem. 2014, 86, 24, 12030-12036)、JRR-3で実施された(4)正確さの実証(ヒ素認証値の検証)(Miura et al., Talanta, 2010, 82, 1143-1148)などが挙げられる。

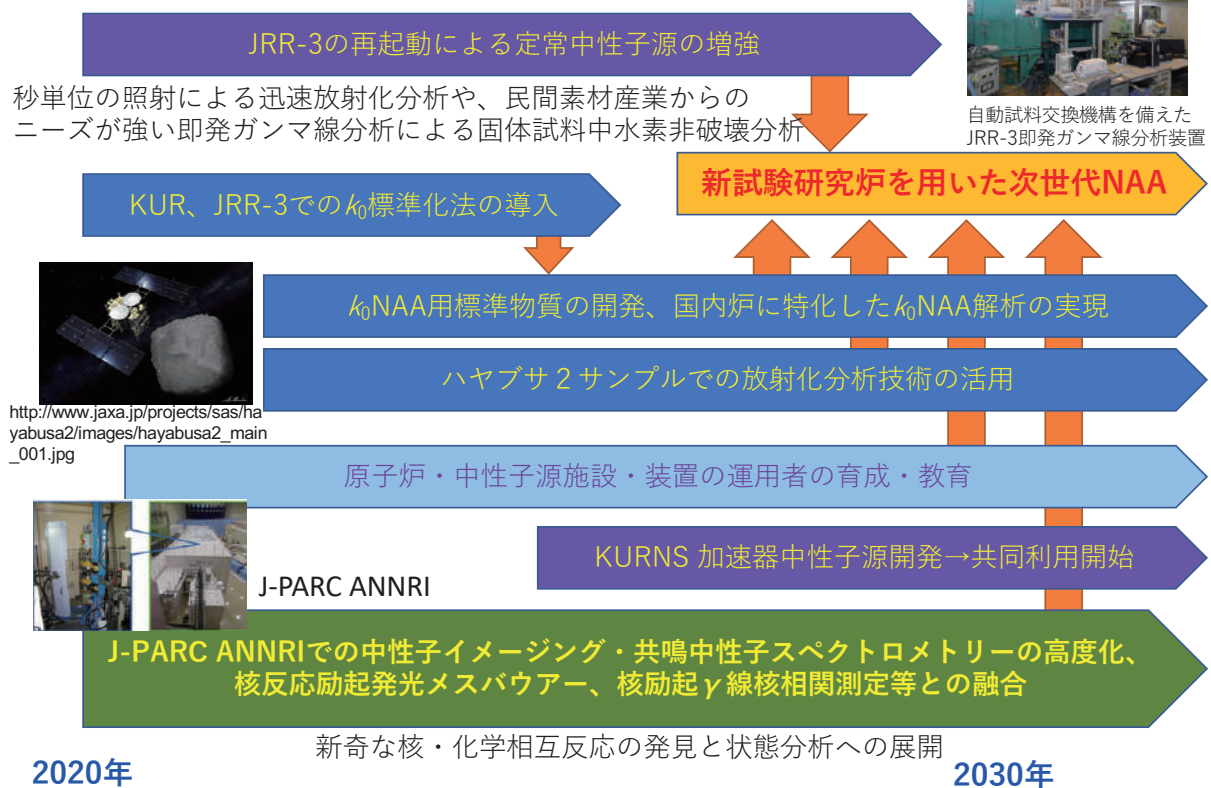
2. 放射化分析法研究の将来

これらの放射化分析法の特徴と実績および放射化分析を行うための施設の状況を加味して検討した今後の展開を図1に示す。まず、研究用原子炉を用いた中性子放射化分析に関しては、利用施設の側面からは現在(2020年12月)KURが唯一の施設であるが、2021年には新規規制基準への対応のため運転が停止しているJRR-3の再起動が計画されており、国内で2基の研究用原子炉が稼働することによる定常中性子源の増強が見込まれている。JRR-3では通常の中性子放射化分析法による元素分析に加えて、秒単位の照射による迅速放射化分析や、民間素材産業からのニーズが強い即発ガンマ線分析による固体試料中水素非破壊分析などの先進的な分析研究の実施が予定されている。分析手法の側面からは、KUR、JRR-3での中性子放射化分析のツールとして共通した k_0 標準化法の導入が検討されている。 k_0 標準化法では定

期的な中性子束や検出器特性に係るパラメーターの取得が必要となるなどの施設側の準備が必要となるが、ユーザーにとっては比較標準となる標準物質の選定や調製が不要となり、分析の利便性が向上することによるユーザーの裾野の広がりが期待される。また、 k_0 標準化法の導入と並行して k_0 NAA用標準物質の開発を行うことで、分析パラメーターの取得を簡便化し、ユーザー側にも施設側にもメリットが大きい k_0 NAA標準化法の実現を目指したいと考えている。つまり、中性子放射化分析を行う上で必要な手順をすべてパッケージ化することで、分析の利便性と信頼性の両方をともに向上させることを目指す。また、2021年にははやぶさ2がリュウグウから持ち帰ったサンプルの放射化分析法による元素分析が計画されており、このような特殊なサンプルを対象として用

いられる放射化分析技術を他の分野へ活用することによる技術の発展も見込まれる。一方、加速器施設を用いた放射化分析では、J-PARCのANNRIでの中性子イメージング・共鳴中性子スペクトロメトリーの高度化や、核反応励起発光メスbauer、核励起 γ 線核相関測定等との融合といった次世代の高度な分析手法の開発が見込まれており、新奇的な核・化学相互反応の発見と状態分析への展開が期待されている。また、京都大学複合原子力科学研究所ではサイクロトロンを用いた新たな加速器中性子源の開発が計画されており、高速中性子や極冷中性子を用いた放射化分析法の開発も計画されている。また、福井県に新しい研究用原子炉（以下、福井炉と呼ぶ）が設置されることが2020年に決定し、その概念設計が始まっており、10 MW程度の中型の研究用原子炉となるこ

放射化分析法の今後の展開



とが想定されている。我々は、この福井炉において前述の各施設で開発され培われた技術や手法を集結した次世代の放射化分析法を展開することを目指している。つまり、 k_0 NAA を機軸としたパッケージ化した分析システムを提供することによる、広く様々な分野のユーザーに提供できる汎用的な分析手法としての確立を行うとともに、高度な分析装置を複数設置することにより特殊な試料の分析にも柔軟に対応できる体制の構築を目指す。

3. 人材育成

当然のことであるが高度な装置やシステムを効果的に利用するためには、放射化分析を行うための研究用原子炉や加速器施設、および付属する設備や装置の運用を行うための人材の育成・教育が必要不可欠であり、教育研究機関である大学と大

型施設を運営する研究機関に加え、産業界とも連携しながら人材の育成を図る必要がある。

4. まとめ

放射化分析法は、研究用原子炉や加速器といった特殊な施設を用いて行う、様々な研究分野で幅広く利用されているユニークな元素分析法である。放射化分析法をより一層発展させるためには、施設の充実に加え分析の利便性を向上させることによるユーザーの裾野の拡張も必要である。そのため、新たに設置される福井炉での次世代の放射化分析の展開と人材育成を視野に入れ、 k_0 NAA を機軸とした汎用的な分析手法としての確立を行うとともに、高度な分析装置による特殊な試料の分析にも柔軟に対応できる体制の構築を目指したい。

特集

原子核プローブの科学のロードマップ

佐藤 渉¹、久保 謙哉²、木野 康志³、山田 康洋⁴(¹金沢大、²国際基督教大、³東北大、⁴東京理科大)

1. 原子核プローブの科学

物質の性質を評価する方法の一つとして、研究対象の物質中に放射性核種を探針（プローブ）として導入し、これらの崩壊過程で放出される放射線を測定することによってホストの物性を微視的視点から議論する、いわゆる原子核プローブの手法がある。この手法を用いる研究者の組織として、第4回（1960年）放射化学討論会で「ホットアトム化学グループの会」が発足し、数度の名称変更を経て、第42回（1998年）から現在の「原子核プローブ分科会」として活動している。分科会発足当初は、原子核の壊変現象が局所環境に及ぼす影響、いわゆるホットアトム効果が主な研究対象であったが、現在では実験設備・装置の目覚ましい進展により、内部磁場、局所構造、格子欠陥、プローブやその周辺の動的振舞いなど、物質内部のミクロな情報を原子レベルで議論することが可能となった。研究対象物質も固体金属化合物をはじめ、金属錯体、有機化合物、高分子化合物、ソフトマター、溶液試料、また、土壌や岩石、隕石などの天然試料など多岐にわたっている。また、放射性核種に限らず、ミュオンや陽電子をプローブとする分光法の開発も進み、物性研究に欠かせない分野として成長を遂げた。以下、便宜的にこれらの放射線の検出による物性研究を総じて「原子核プローブの科学」と呼ぶことにする。本稿では、この原子核プローブの科学で採用される各種分光法の特徴と将来的な展望を述べる。

2. 原子核プローブの科学で用いられる分光法の特徴

物質内部の局所情報を得る「原子核プローブの科学」では、研究目的（取得したい情報）に応じた物性観測が行われる。以下、それぞれの観測に用いられる主な手法の特徴を紹介する。

超微細場の測定を目的として利用されている主な分光法として、メスバウアー分光法、 γ 線摂動角相関/角分布法、 β -NMR/NQR法、低温核偏極法、そして μ SR法が挙げられる。これらの分光法によって得られる情報は、主にプローブ位置での内部磁場および電場勾配（ μ SR法を除く）であり、プローブとして採用できる原子核はそれぞれの分光法の原理に依存している。また、研究対象のホスト物質を構成する元素によってプローブに適不適があるため、研究対象によって採用できる分光法もある程度制約される。これらの手法に共通する長所（メスバウアー分光の透過法を除く）は、試料のバルク物性に影響を与えない極微量（ \sim ppt レベル以下）のプローブで局所場が観測可能な点にある。これは、安定同位体をプローブとして同様に局所場を観測するNMRやNQR、ESRとは異なる点であり、特に高純度物質中の微量不純物の挙動を調べる必要がある系（例えば不純物半導体）の研究に最適な手法といえる。また、内部磁場や電場勾配の観測に重要な核モーメントの選択において、安定同位体の基底状態には存在しないモーメントを、不安定核や励起核に求めることも可能であるため、得られる情報量も広がる。さらには、バルクの測定にはかからない局所磁場の観測が可能である点も大きな長所である。

物質中に導入される陽電子も、プローブとして原子空孔や周辺の局所構造などの情報を与える。主な分光法として、陽電子消滅寿命分光法、ドップラー拡がり法、 γ - γ 角相関法が挙げられ、さらにこれらの手法の組み合わせによってより詳細な情報を取得する方法論も確立されている。研究対象物質も金属、半導体、高分子材料など、広範囲に及んでいる。

上記の分光法にはそれぞれ長所・短所があるが、紙面の関係上、これらの詳細な記述は割愛し、表

1に要点をまとめた。

3. 今後の期待と展望

表1で示した通り、それぞれの分光法にはバルクの物性測定では得られない局所場の情報を与える長所がある反面、研究対象物質の状態、プローブのスピン偏極度など、制約も多い点が短所となっている。特に放射性核種を用いた超微細場の観測では、それぞれの分光法の原理によって適用できる核種が限定される。物質内部の局所場を「隈なく」観測するには、より多くの種類のプローブを開発することが不可欠である。このことを実現する上で、近年注目されているのが加速器を用いた新規プローブの開発である。例えば発光メスバウアー分光法や摂動角相関法では、従来プローブ核の導入には何らかの化学操作を必要としていたため、長寿命核種に限定されていたが、核反応で生成した短寿命核種を研究対象試料にイオン注入し、オンラインで測定できれば、プローブ核の種類が飛躍的に広がる可能性がある。また、原子核による放射光の共鳴吸収を利用した核共鳴散乱法は、試料中に存在する安定核をプローブとすることが可能であるため、今後、多様な研究対象に適用することが期待される。プローブの種類に加えて、導入するプローブの入射エネルギーを

制御する試みもある。物質の表面はバルクとは異なる性質を示すことから、例えば化学反応の場としての利用が期待されている。この反応場の物性を調べるには、プローブを浅い位置に選択的に導入する技術の開発が求められる。現在、原子線共鳴法による超低速・高偏極 RI ビームの開発や、超低速ミュオン、超低速陽電子ビームの開発が進められており、今後様々な物質の表面物性を微視的な視点から解き明かすことが可能となるであろう。

局所場の微視的な情報の取得に加え、物質中の元素分析にも放射性核種やミュオンの崩壊現象が利用できる。手法として、原子炉中性子を利用する中性子放射化分析法や即発 γ 線分析法、また、加速器を用いた核反応分析法やミュオン X 線分析法などが挙げられる。これらの手法の方法論や測定技術のノウハウを蓄積している放射化分析分科会の皆さんと連携協力し、局所場を観測する分光法とともに研究手法として採用することにより、さらに詳細な物性の解明が期待される。

この度、本学会が法人として新たな一步を踏み出すことを契機に、以上の内容を原子核プローブ分科会としてロードマップにまとめた(図1)。マップには日本放射化学会員が直接関与していない手法も一部含まれているが、他の組織との連携によって分野を横断した研究を展開することによ

表1: 原子核プローブの科学において用いられる分光法の特徴

分光法	得られる情報	短所	主な課題と期待	
メスバウアー分光	<ul style="list-style-type: none"> 超微細場 局所構造 電子状態 核スピン緩和(原子・分子の運動性) 	固体の物性研究に限定	新規プローブ開発	放射光を利用した核励起によるプローブ生成
γ 線摂動角相関 / 摂動角分布		汎用性の高いプローブ核が限定的		原子線共鳴法による高偏極ビームの生成
β -NMR / β -NQR		プローブのスピン偏極生成が不可欠		試料とプローブの多様な組み合わせの試み
低温核偏極				
μ SR	<ul style="list-style-type: none"> 内部磁場 ミュオンの運動性 	限られた加速器施設(世界で5ヶ所)	超低速ミュオン / 陽電子ビームの開発と応用	
陽電子消滅分光	格子欠陥・原子空孔のサイズや濃度	クリアカットな情報の取得がやや難		

り、「原子核プローブの科学」が物性研究の中で確固たる位置を占め、さらなる発展を遂げることを期待して止まない。

本稿およびロードマップの作成にあたり、三原基嗣氏（大阪大学）、筒井智嗣氏（JASRI）、大坪隆氏（新潟大学）には多大なるご協力をいただきました。この場をお借りして御礼申し上げます。

また、本ロードマップ作成ワーキングメンバーの山田康洋氏は、マップの完成を見られずにご逝去されました。原子核プローブ分科会のみならず、日本放射化学会の発展に多大なるご貢献をいただいたことに感謝申し上げますと共に、謹んでご冥福をお祈り申し上げます。

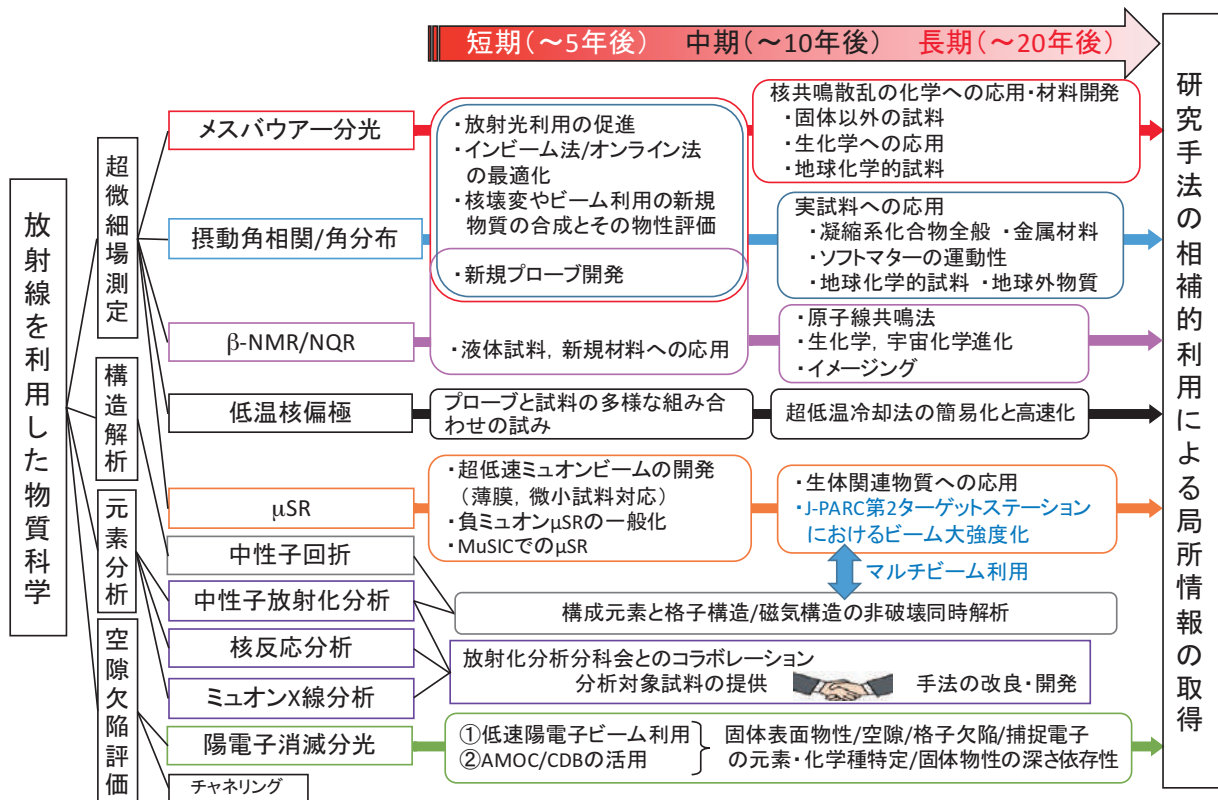


図1：原子核プローブの科学のロードマップ

特集

環境放射化学のロードマップ

別所 光太郎¹、坂口 綾²、佐藤 志彦³、田上 恵子⁴、高橋 嘉夫⁵(KEK¹、筑波大²、JAEA³、QST⁴、東大⁵)

1. 環境放射能研究の歴史と社会における位置づけ

我が国における環境放射能研究は、核関連事故と核汚染の歴史に関わる研究分野と言っても過言ではなく、負のイメージを伴うことも多い。広島・長崎原爆に関わる残留放射能評価に始まり、核実験によるグローバルフォールアウト（1950–1960年代）、チェルノブイリ原発事故（1986年）、JCO臨界事故（1999年）などが発生するたびに、環境放射能研究は重要性を認知されてきた。しかし、時間の経過と共に国民からの注目も減少し、研究者の数や予算の縮小が繰り返された。ラジウムやラドン、¹⁴C等の天然放射性核種を対象とした地球科学研究は、脈々と継続している。

直近では、2011年の福島第一原発事故で多量の放射性物質が環境に放出されたことを踏まえ、環境放射能は多くの国民により身近な存在となった。小規模な原子力施設のトラブルに関するニュースでも放射線・放射能の環境影響が触れられることから、放射能への関心が以前に比べ高まっていることがわかる。ぎりぎりその余韻が残る今こそ、この高まりを定常的なものとするため、関連学会と連携して放射化学の重要性を示す必要がある。

国策として原子力を基幹エネルギー源として位置付ける限り、その関連基礎科学である放射化学を学問としてもっと広く国民に理解してもらいたい。そのためには、各論の寄せ集めではなく、放射化学をより体系化された形で教える工夫が必要であろう。そのためにも、放射性元素が周期表に残された最後のフロンティアであること（周期表のフロンティア）、一方で重元素の化学結合にはソフト的な性質・共有結合的な性質が付与されること（化学結合論のフロンティア）、その検出には微量分析の粋を集めた技術が必要なこと（分析化学のフロンティア）など、放射化学が化学の根

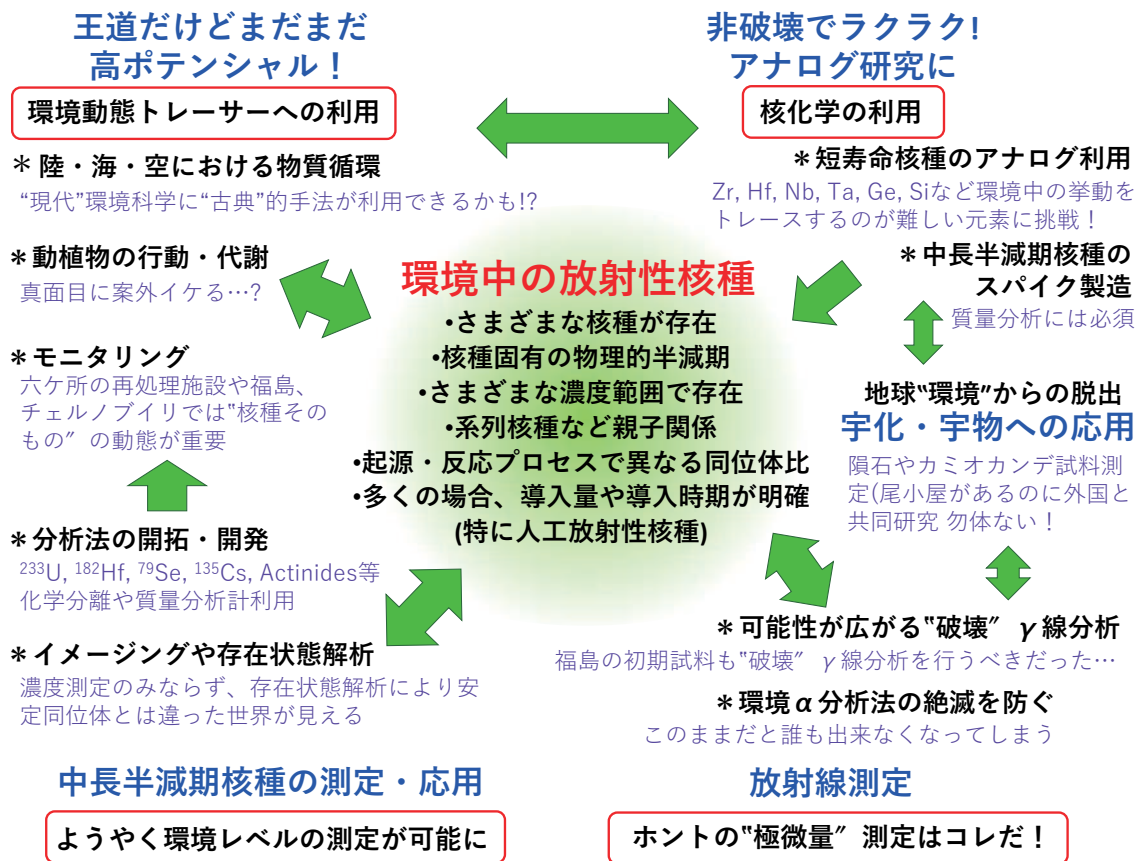
幹を担い、フロンティアを開拓するサイエンスであることを我々自身が強く認識し、その重要性をアピールすべきである。

これらはアウトリーチ活動においても同様である。放射性核種・放射能は、地球誕生以来、天然環境（無生物）や生物中に広く存在し、我々人間もそれに対応するように進化してきた。地球内部の熱源として放射能は重要であり、例えば温泉があるのは放射性核種の寄与による。このように放射能・放射性核種は人類にとって常に身近なものであったことを伝えるためにも、例えば出前授業のような活動を関連学会等と連携した活動として推進していくべきであろう。

2. 学術分野としての位置づけと今後の課題

福島第一原発事故以降、環境放射能が必ずしも専門ではない化学系や工学系の研究室や研究者が、環境放射能・環境放射化学分野に進出し、極微量のPu、Csの測定やマイクロパーティクルに関わる研究などの新たな取り組みも推進された。研究者の増加と共に、極微量同位体測定や顕微鏡などの新たな測定手法の導入も分野の発展に貢献した。また、従来は単純なアルカリ金属と捉えられてきたCsが環境中で興味深い挙動をとることが明らかとなり、その環境挙動に関わる理解が深まるなどの新たな進展も見られ、多様な学会での報告も増えた。しかし、事故から10年が経過し、再び予算縮小と研究者離れが繰り返されようとしている。事故からまだ10年である。今後これらの様々な学会と連携して、分野の重要性と存在意義をより強くアピールしていく必要がある。医歯薬（生理学）研究分野において、事故初期や現在のモニタリングデータはあまり活用されていないが、これらの分野との連携も今後重要である。

環境放射化学は、核種を「きちんと測定」して「環



(図 1) 環境放射化学分野における様々な研究アプローチ

境動態研究に生かす」ことを目的とする実用科学が主の分野であり、それゆえに社会のニーズに左右されやすい。環境試料中の極微量放射性核種の分析は技術的に容易ではないことに加え、法律や規制の厳しさや複雑さ、調査地域への立入許可を得る困難さなどの問題も関係し、「きちんと測定する」ことすらできない状況も生じた。これらの側面も重なり、環境放射化学研究が分野内外から魅力的に感じられていない面もあったように感じる。今こそ我々は、環境放射化学が、放射化学の3つのフロンティアを含んだ重要な分野であることをアピールすべきである。環境放射化学は、核化学と連携しつつ、環境中で未同定の放射性核種を探索する(周期表のフロンティア)ことで様々な応用研究を生んできた。これらの研究のために、高度な分析法を開発してきた(分析化学のフロンティア)。同時に、こうした放射性核種の挙動解明のために、それらの化学結合の性質の理解を進

めてきた(化学結合論のフロンティア)。最後に、環境放射化学は、放射化学分野の中でも最も世の中と接点を持つ分野である。我々はこれらのことを認識し、その面白さと重要性を強くアピールしていくべきであろう。

環境放射化学の面白さや重要性を示す事例は枚挙に暇がない。環境中の放射性核種は、様々な核種が様々な濃度で存在すること、固有の物理半減期、系列核種などの親子関係、起源・反応プロセスで異なる同位体比、初期導入時期や導入量が多くの場合明確なことなどの特徴に対し、放射化学的手法はきわめて優れた研究ツールとなり得るものである。また、環境動態トレーサー研究、前処理も含めた分析技術の開拓、核種製造や核化学、放射化分析の利用などを通じ、地球惑星科学、宇宙科学、生物科学、年代学など他の多くの研究分野に波及し連携する可能性を有し、大きな魅力を示せる研究分野と言える。(図 1)

今後の取り組みにおいて重要な点は、「堅牢な学術分野としての環境放射化学」を確立していくことである。自由な発想に基づく最先端研究、たとえば、環境中の極微量放射性核種を正確に定量し存在状態を明らかにすることや、計算科学的アプローチも組み合わせ重元素も含めた「環境中のアラユルニウム」への取り組み、などが考えられる。安定元素の存在量を測る古典的な学問から歩を進め、環境中に実際に存在する放射性核種/同位体を測定するからこそ見出すことができる新たな発見もここには期待できよう。社会の要請を満たす責務として環境動態評価を行っていくことも必須であり、これらの取り組みでも新しいサイエンスを見出しながら取り組む姿勢が重要である。福島、人形峠、広島、長崎などのレガシーサイトや、尾小屋の極微量放射線計測設備などのユニークな研究環境を、日本独自の財産として風化させない、前進するための場として活用することをこころがけながら、国際連携にも取り組んでいきたい。研究で得られた測定データや研究成果の重要

性や面白さは、国民のニーズに対応する形で提供し、理解してもらえるように取り組むことで還元する。研究と社会の関係がうまく回りはじめると、規制緩和につながる可能性も広がり、さらに自由な研究展開が可能となり研究分野も発展するよい循環につながっていくのではないかと考える。

将来に向けての重要課題である人材育成においては、残念ながら大学の放射化学関連講座は全国的に減少する傾向にあるが、魅力的な学術分野を確立することで、講座の新設・増加につながることを期待する。

3. 環境放射化学研究の発展に向けて

研究分野の推進や社会との関係性構築には、一人ひとりの研究者が各自で取り組んでいくことが基本であるが、堅牢な学術分野として生き残っていくためには、組織的に物理的な拠点を形成することで、社会問題・学術発展に一丸となって取り組むことが有効なアプローチと考える。例えば、(図2)に示す「環境放射化学研究開発機構」の



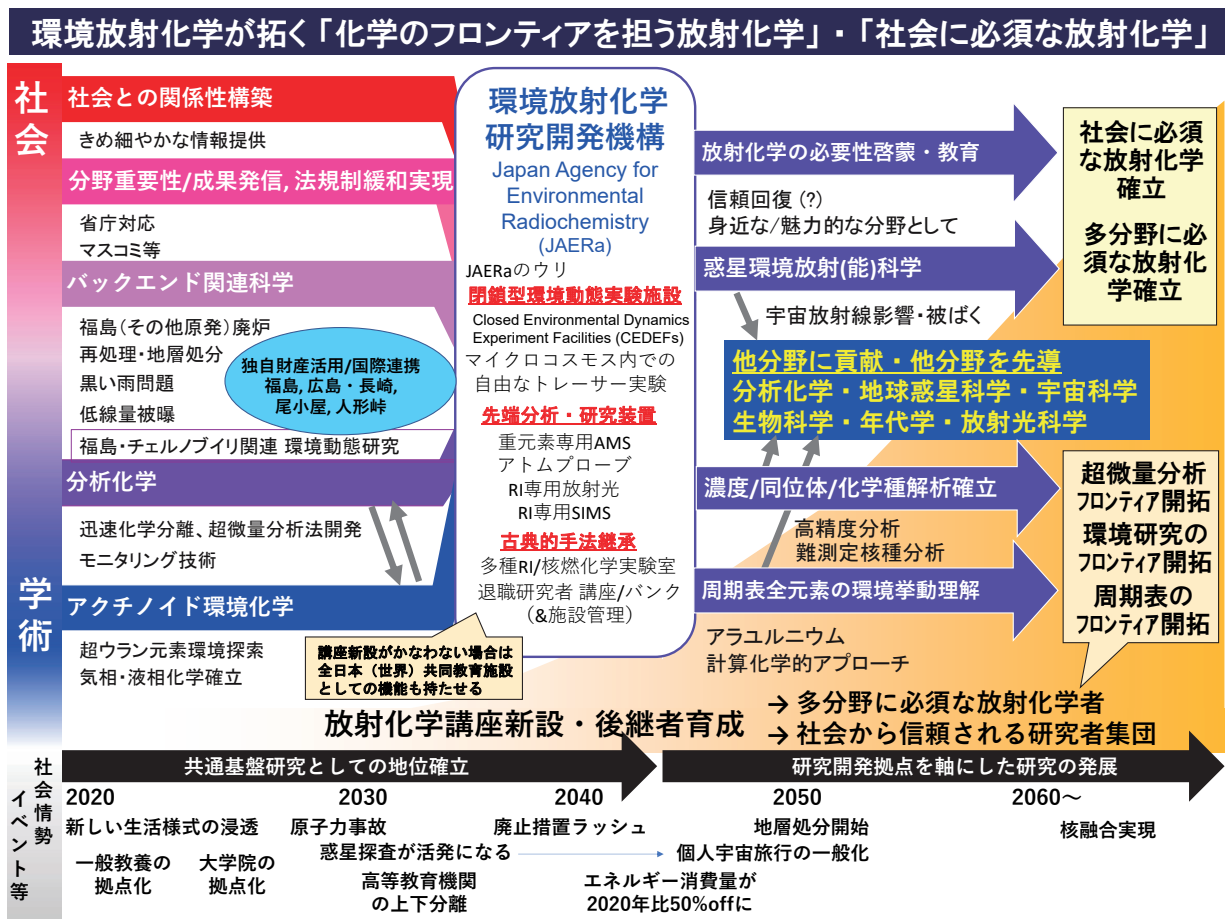
(図2) 「環境放射化学研究開発機構 (仮称)」 の概念

ような大規模な研究組織の構築を目指す方法が考えられる。構想としては、様々な放射性核種を使った環境動態研究が実施可能な「閉鎖型環境動態実験施設」のような他にはない独自の実験環境を構築・実現し、さらに様々な環境試料測定に適用できる最先端の研究設備や、あらゆる元素・核種の取り扱いが可能となる化学実験室環境などの機能を持つ大規模な研究機関が考えられる。大学の放射化学研究室が十分な形で維持・継続することが容易でない状況においては、このような組織が放射化学分野における中核機関として大学院大学のような役割を果たすことができれば、教育研究の

場ともなり得るものとする。これらの組織には、人材バンクや、知識や手法の継承を担う組織としての役割も期待される。

これらを考え、社会・学術的に必須とされる放射化学分野を確立することが理想である。より詳細については、当WGメンバーの思いを詰め込んだロードマップ(図3)をぜひご欄いただきたい。ロードマップや取り組み内容に関するご意見やご提案などがございましたら、ぜひ学会事務局までお寄せください。

環境放射化学分野の発展に、皆様からのご意見、お力添えをお願いいたします。



(図3) 環境放射化学 ロードマップ