

特集

「放射化学の夢ロードマップ」について

篠原 厚¹、羽場 宏光²、佐藤 渉³、高宮 幸一⁴、別所 光太郎⁵(¹ 会長・阪大 IRS・大阪青山大、² 理事・理研仁科セ、³ 理事・金沢大理工、
⁴ 理事・京大複合研、⁵ 理事・KEK 放射線科学セ)

[はじめに]

日本放射化学会は、昨年（2021年）4月1日から正式に新法人に移行し一般社団法人日本放射化学会としてスタートしました。9月に法人になって初めての（コロナ禍でオンラインとなりましたが）討論会を開催し、その特別セッションで、学会全体としての「(一社)日本放射化学会 研究展開ロードマップ(2021年度版)」を披露しました。この全体版のロードマップは、討論会やその後の意見収集(パブコメ)を経て、さらに改定を重ねた最終版を公表することが了解され、現在その作業を終えようとしています。

本稿では、会員の皆様に公開の同意を得るプロセス(これまでの経緯)、最終版の作成方針や理念、各分野の説明、ロードマップへの期待と今後の運用などについて、会員の皆様にご理解いただき、自分たちのロードマップとして活用いただけることを願って、作成に関わったロードマップ世話人グループで寄稿したものです。ぜひご一読いただき、「放射化学の夢ロードマップ」へのご意見などお寄せいただければと思っています。今後は、各部会を中心に2年ごとの更新を続けることとしていますので、その際に皆様のご意見を反映できればと思っています。

[これまでの経緯と全体方針]

学会のロードマップを作成するきっかけや理念、目的は、前回の記事(「放射化学」第43号、p.1-20)に記載させていただいていますので、詳細はそちらに譲り、ここでは、その後の経緯と全体版策定の方針、パブコメでいただきましたご意見の骨子とそれへの対応を簡単にまとめ、それぞれの分野の内容を担当頂いた世話人に概説頂きました。

このロードマップは、我々の新たな学会の教育研究のビジョンと夢を描くベースとして、現在一近未来から、未来の夢に至るまでのマイルストーン的なものを並べたものです。当然、我々の放射化学は分野によってかなり色合いも異なりますので、全員一致で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なく、会員各自の教育研究の方向・将来構想を描く一助として、また、いろいろな場で放射化学をアピールするために活用できればと思っているものです。さらに、ロードマップというものは、当然どんどん進化するもので、皆さんで書き換えてゆくような雰囲気こそが必要と思っています。

ここで簡単に経緯を復習しますと、このロードマップ作成の取り組みは、2019年度の第63回討論会(いわき)の学会創設20周年の記念事業の一つとして、分科会を軸にして4分野(核化学、核プローブ、放射化分析、環境)と教育の5つのワーキンググループ(WG)を立ち上げ、足掛け2年間にわたり、各分野のロードマップの検討を行いました。そのロードマップは、2020年の第64回討論会(豊中)で披露され、その際のパネル討論会で学会全体として公開のロードマップを作ろうということになりました。この作業は各分野のロードマップWGの世話人が集まり(当然その裏にWGメンバーが協力しています)、以下の方針で進めました。

(以下パブコメ実施の際の説明文を抜粋)……………
学会ロードマップ策定の方針

- 基本方針： 各ロードマップを元にまとめる(各ロードマップのエッセンスを抽出)
分科会の枠を外し共有、分野の理念・方向を示す、マイルストーン…

- 縦軸 (分野) : 分野として基礎 - 応用、社会貢献、基盤設備、教育人材を設定
- 横軸 (時間) : 現在 -10年 - (計画) -20年 - (構想・夢へ) -50年 -

今後の予定 (一般公開まで)

- 法人化記念式典で学会ロードマップを披露
⇒ 2021年の第65回討論会 (都立大・理研) にて実施済み
- 公開に向けた意見聴取 (パブコメ) : 第65回討論会から～2021年10月31日 ⇒ 実施済み
ポスターセッション コメント欄に意見を自由記入
学会ホームページ (会員ページ) 上に掲載 (詳細はMLでアナウンス)
- 改定作業を経て、学会ホームページ上で一般公開 : 2021年度内

現在、上記の一番下段の改定作業をほぼ終了し、2022年6月の会員総会までに、学会ホームページ上で一般公開すべく準備を進めています。

パブコメでは、いろいろ貴重なコメントを頂きました。ここでは詳細を省きますが、それぞれの専門のお立場からの内容・項目への意見や、分野ごとの表現の違い、体裁に関すること、第3者によるレビューの提案など多岐にわたりました。ただ、否定的なご意見は無く建設的なものばかりで感謝しています。改定作業では、コメントを精査させていただき、現時点で可能な改定と次期更新時の課題とさせていただく部分に仕分けし、対応することとしました。それゆえ、本稿に掲載しているロードマップ (ほぼ公開版) は当然完全なものではありませんが、今後、継続して更新をしてゆくことを前提にご容赦いただければと思います。

全体の方針と体裁は、上記の方針に記載してある通りで、時間軸の右のほうは「夢」に当たる部分で特に50年にこだわったものではありません。それぞれの分野の帯にその分野の理念や方針が記載されており右端 (赤枠) にゴールが示されています。社会貢献の部分は他学会・機関等との連携で我々が大きく貢献して実現したい項目です。それぞれ少し表現の仕方が違っていますが、以下の分野ごとの説明をお読みいただき、その思いをご理解いただければと思います。

[基礎科学・核化学分野]

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」です。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がそれにあたります。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ります。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、特に原子核物理学や原子物理学と深い関係にあります。また、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します。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ります。

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、106番超重元素シーボーギウムのカルボニル錯体の化学合成、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、トリウム-229mの人工的生成等、特筆すべき成果が多数上がりました。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・反応の理解、核・原子模型完成による物質の究極的理解が核化学研究の基軸となっていくでしょう。これら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不可欠です。今後、より短寿命かつ希少な元素と同位体を研究対象としていくためには、単一原子から極微量物質の取り扱い、原子核、原子、分子、イオンの操作 (製造・分離・検出) 技術の革新も必要不可欠になります。

核化学分野の近未来 (～10年) のマイルストーンとして、119番新元素の発見、第7周期元素の

化学、Th-229m 原子核時計を、続いて(～20年後)、130番元素の発見、 $\pi \cdot \mu$ 原子化学、第8周期元素の化学、そして50年後以降、夢として、安定の島への上陸と反物質による化学を掲げました。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までもありません。

2022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周期が完成しています。元素は173番元素くらいまで存在するという理論があります。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ません。今後も核化学は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しょう。

[原子核プローブ分野]

物質科学において、研究対象の物質中に放射性核種や素粒子を探針(プローブ)として導入し、これらの壊変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評価する分野があります。いわゆる「原子核プローブの科学」です。放射化学においては、原子核の壊変現象が局所環境に及ぼす影響を調べる「ホットアトム化学」から発展した研究分野です。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から議論することが可能となり、物性研究に欠かせない分野として成長を遂げています。研究手法ならびに研究対象は多岐にわたっているため、今後数十年の間にこの分野がどのように発展するのか、想像するのは容易ではありませんが、期待という意味では様々なことが言えます。このロードマップに冠された「夢」という言葉にはそぐわないかもしれませんが、現実的に次のような進展が期待できると考えられます。

原子核プローブの科学の最大の長所は、バルクの物性測定では得られない微視的な情報を与えることにあります。その反面、スピンやその偏極度、

半減期など、個々の分光法の原理の束縛によって、適用できるプローブが限定されるという短所も合わせ持っています。しかし、加速器や原子炉による核反応によって生成した短寿命粒子をオンラインでビームとして対象物質に注入する手法を採用することで、種々の新規プローブの開発が可能となり、上記の短所を克服することができるでしょう。新規プローブの開発に加えて、(偏極)RI、ミュオン、陽電子などの超低速ビームの開発によって、表面物性の研究の進展も大いに期待できます。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では、試料中に存在する安定核がプローブとなるため、生体物質や宇宙・地球科学試料など、熱処理できない物質の研究の裾野を拡げる可能性にも期待できます。以上の方法論については、現時点で既に走り出しているものもありますが、物質内部の局所場を「隈無く」観測するには、ビームエネルギーの自在制御および高強度化が不可欠であり、しばらくはこの技術の蓄積に時間を費やすことになりそうです。

「物質を科学する」には、局所場の微視的な情報の取得に加え、構成元素の分析も不可欠になります。将来的には既存の放射線測定技術に立脚した元素分析法(中性子放射化分析法、即発 γ 線分析法、核反応分析法、ミュオンX線分析法など)と上記の局所場測定を組み合わせた非破壊同時解析法の開発も視野に入れたく思います。また、理想的な物質、極端な表現をすれば、特定の場所にプローブを含んだ希望する原子配列をもつ物質を構築する技術(例えばエピタキシャル合成など)の高度化を進めることも必要となるでしょう。これらのことを実現するためには、RI製造技術、測定技術のノウハウや方法論を蓄積している他の部会(核化学、放射化分析、環境放射化学)や放射化学会以外の分野の研究者との連携協力が必須になります。分野を横断した研究を展開することにより、「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ます。

[放射化分析分野]

2020年の討論会で説明しました放射化分析分野の研究展開ロードマップでは、約10年後まで

の比較的近い将来での本分野における展開が示されました。そこでは、国内での放射化分析研究の中心的な役割を担っている日本原子力研究開発機構 (JAEA) の研究炉 JRR-3 及び京都大学複合原子力科学研究所の研究炉 KUR、JAEA と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が共同で運営する大強度陽子加速器施設である J-PARC を中心とした、放射化分析法の高度化を目指した研究、教育の取り組みが紹介され、これらが最終的な (10 年後の) ゴールとしての新試験研究炉を用いた次世代の放射化分析法の実現へとつながっていました。このロードマップを出発点として、「(一社) 日本放射化学会 研究展開ロードマップ (2021 年度版)」中に時間軸を 50 年後まで伸ばしたロードマップが組み込まれ、その後さらに議論を重ね修正を試みてきました。その結果、前述の新試験研究炉での「次世代放射化分析法の実現」は「高度標準分析法への発展」へとより具体的な表現に変更し、小型中性子源・光子源の開発によって実現されるであろう「(放射化分析法の) 汎用化」、検出器や測定系の性能向上によって実現が期待される「あらゆる核事象の同時測定法の開発」を加えた 3 つの大きな研究開発の流れを記載することとなりました。50 年後にはこの 3 つの流れが結集することで実現が期待される「全元素リアルタイム 3D イメージング」を目標 (夢) として示しました。「全元素リアルタイム 3D イメージング」とは、原子核の励起、脱離、核反応などあらゆる核事象を駆使した融合型の次世代化学分析として、超微量 (アトモル) レベルの全元素を分析対象とした、in-situ かつ 3 次元での位置 (原子配列) 情報も同時に得られる分析手法を思い描いており、実現すれば放射化分析や放射化学の分野を超えた汎用的な分析技術として科学研究の広い分野で活用される手法となることが期待されるでしょう。

[環境放射化学分野]

我が国における環境放射能に関わる放射化学研究は、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)、福島第一原発事故 (2011 年) による放射性

物質の環境放出など、核関連事故と核汚染の歴史に係る調査研究活動を中心に進められてきました。福島第一原発事故以降は、国民の放射能に対する関心の高まりを背景に、様々な分野の研究者が環境放射能研究に関わるようになり、極微量の Pu, Cs の測定、顕微鏡技術を用いたマイクロパーティクルに関わる研究、航空機サーベイやロボット / 自動化測定装置などの新たな手法も活用した環境中の放射性核種に関わる調査研究成果を、様々な学会や報道等で目にする機会が増えました。環境放射化学は、核種を「きちんと測定」して「環境動態研究に生かす」ことを主目的とする分野ですが、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、調査地域への立入許可や規制の厳しさなどにより、希望する測定が容易に実施できないなどの状況も重なり、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ます。

環境放射化学は、核化学と連携して未同定の放射性核種を探索する「周期表のフロンティア」、環境試料分析に必要な高度な分析手法の開発を目指す「分析化学のフロンティア」、放射性核種の挙動解明のために化学結合の性質の理解を進める「化学結合論のフロンティア」などの特徴を持ち、社会と多くの接点を持つ研究分野でもあります。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り、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 / 同位体を正確に定量し存在状態と性状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すべての元素を対象とする「環境中のアラユルニウム」への取り組み、などが考えられます。さらに地球惑星科学や宇宙科学、生物科学、医学、年代学、地球温暖化関連科学など他分野への波及効果と新たな知見や手法の導入を意識し、他分野と積極的に連携をはかることも重要です。社会の要請を満たす責務として、バックエンド由来核種の環境動態評価を進めることも必須であり、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必要です。福島、広島、長崎、人形峠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み、測定データや研究成果の重要性や面白さを国民のニーズに対応する形で提供し、広く理解してもらえるように取り組むことで社会に還元することが求められます。

世界では、今後20～30年間に200基以上の原子力発電所が廃炉となると見込まれています。福島第一原発をはじめとする廃炉や除染を含めた環境回復への取り組み、放射性廃棄物の再処理・地層処分・核変換処理への取組みなど多くの社会活動において、放射性核種の環境挙動を定量的に評価し理解する「放射化学」が果たすべき役割は高まっています。研究用原子炉や加速器利用施設、最先端分析装置の活用、閉鎖型環境動態実験施設などの大規模施設の実現に他分野と協力して取り組むと共に、長い歴史と多くの知見を財産とする放射化学の手法と知識の継承も大切に、質の高い研究成果を発信し分野の活性化をはかっていくことをめざします。

[社会貢献パート]

2021年、福島第一原子力発電所事故から丸10年を迎えました。この事故は、放射化学の研究分野に大きな影響を与えてきました。今後も放射化学は、物理学、化学、工学等、他分野と協力し、除染技術の開発、核廃棄物の有効利用・発電、RI電池の実現に貢献すべきでしょう。さらに、核変換による廃棄物処理への貢献が期待されます。本ロードマップには、夢として、核反応による発電と生じた廃棄物の処理を同時に行う、無廃棄物核反応炉発電を提案しています。一方、生物学、医学、薬学分野では、2010年代、ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT: Boron Neutron Capture Therapy) が普及し、現在ではアイソトープ治療、特にアスタチン-211やアクチニウム-225等、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ています。日本発アルファ核医薬品、有用RI国産化、RI・核医薬品輸出、ホーム核医学診断治療を実現させる上で、放射化学が果たすべき使命は極めて大きいと思われれます。夢として、コンパクトかつ安全な加速器・原子炉・核融合炉を用いたRIの自家製造とRI利用を掲げています。放射化学が

探求する知見と技術は、確実に社会に還元され、安全安心健康長寿社会の実現に繋がっていくと著者らは確信しています。

[教育人材育成パート]

教育人材育成のロードマップは、前回ロードマップの記事でも述べましたが、特に50年先の夢の話にはすぐわないと考え、10-20年程度について検討しています。社会情勢や一般の教育環境の変化にも大きく関わるため、長期的課題・方針を持ちながらも、中期計画的にリアルに検討し進める必要がある分野と考えています。

ロードマップに上げている内容は、他との調整は少ないため、昨年度の分野別ロードマップをほぼそのまま(簡略化されていますが)掲載したのとなっています。その中で、組織的な取り組みの必要性を挙げ、教育部会の設置を提案しましたが、現在、それはすでに実現し、実際の行動に移す段階にあります。

我々の分野の大きな課題は、人材であることは言うまでもなく、前回にも書きましたように、一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。—という状況を鑑みると、放射化学会の果たす役割は大きいと考えます。具体的には、現在の学生・若手の支援はもとより、広く学生に我々の分野やその魅力を知ってもらおうべく、大学、大学院の教育の充実を支援し、同時に関係する教育自体が無い大学等への教育機会の提案・提供、関連分野への放射線やRI実習等の支援、それらを効率的に進めるための教材コンテンツの開発やそのDXの推進などがあり、特に、コンテンツのDXはコンテンツアーカイブの作成と並行して、早期に進めるべきもとと考えています。また組織的な課題としては、関係学協会との教育人材育成面での連携や、社会教育、学校教育への関与も重要な課題であり、ロードマップに記載し、着実に進めるべきと考えています。

分野としての目標は、ロードマップに記載して

いますが、本当に放射線・RIが扱える人材が枯渇しつつある中、山積する人類的課題への対応や未来社会の自由度を失わないためにも、我々の分野の人材育成は最優先課題です。教育部会を司令塔として、放射化学会が組織的に当該分野の教育人材育成の推進もしくは支援を具体的に進め、ロードマップを実効性のあるものとすべく、会員各位の協力をお願いいたします。

【終わりに】

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いただければ、その役目の半分以上は果たせたと思います。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し、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にも、ロードマップを基に取り組めればと考えています。さらに、会員の連携が進み、大きなプロジェクトの予算獲得の資料や国へのアピールの際に、学会や学問分野のビジョンを示すものとして活用できれば幸いです。

最後に、ロードマップを活用するには、それが常に新鮮で会員の思いが反映されていなければなりません。そのためには更新を続けることが必須です。ロードマップWGと理事会では、部長に各部会のミッションとして2年ごとのロードマップ更新をお願いしています。世代を超えた部会員間の意見交換のネタとして、是非ともよろしく願います。ロードマップの各分野の右端にある「夢」は実現するためにあります。

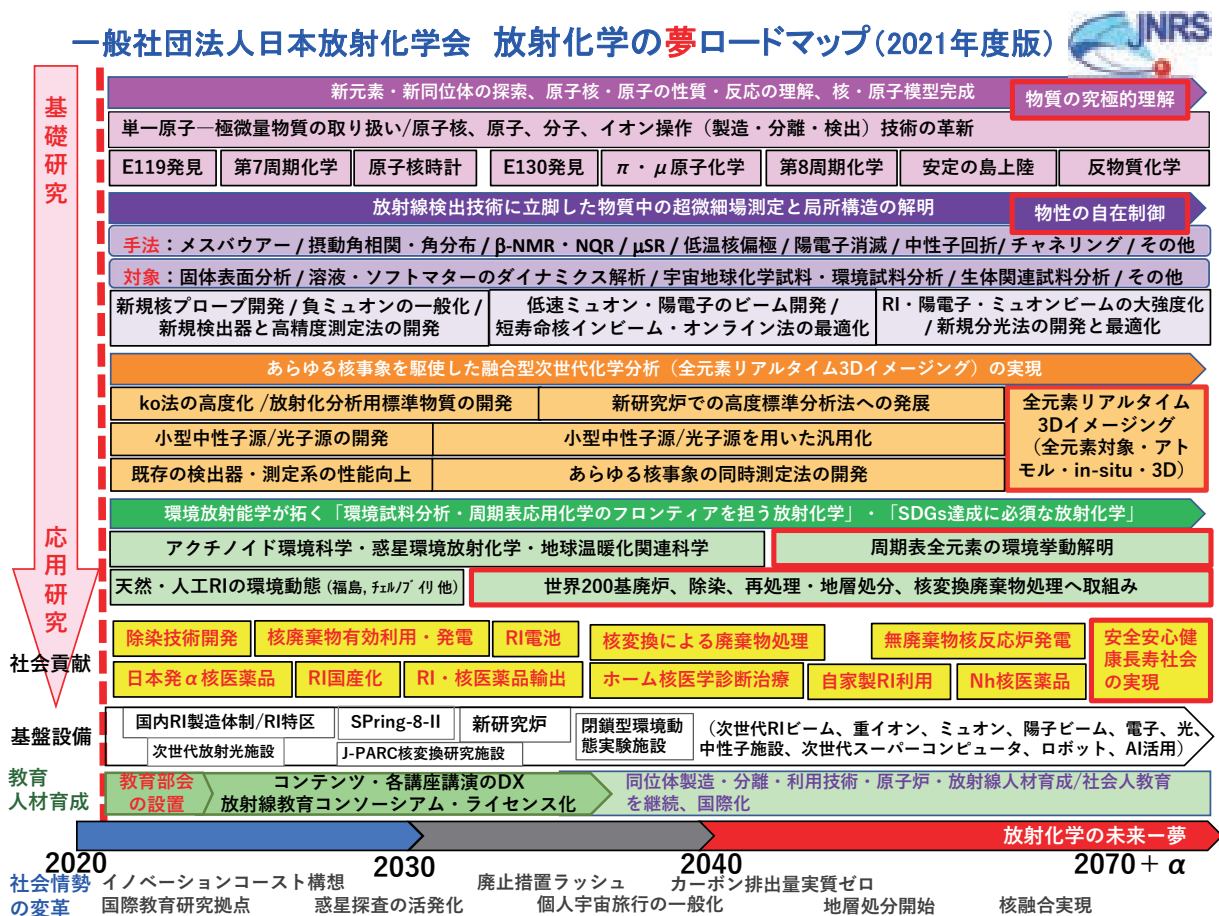


図 「放射化学の夢ロードマップ (2021年度版)」