7−2 量子ビーム・RI を利用した先端研究及び先進医療

量子ビームは、電子線、中性子線、陽子線、重粒子線、放射光等の総称です。それぞれの線源と物質との相互作用の特徴を生かして、物質の構造や反応のメカニズムの解析等が行われています。これにより、物質科学や生命科学が発展し、医療のほか、素材、エレクトロニクス、環境・エネルギー、創薬・保健等の様々な分野に応用され、イノベーションを生み出しています。医療分野では、我が国で発展した重粒子線によるがん治療が世界に広がりつつあります。ミュオンによる新規元素分析法やα線を用いた標的型がん治療等、放射化学と呼ばれる分野が物理と化学の境界領域で発展しています。

電子線、中性子線、陽子線、重粒子線、放射光をビームとして取り出す加速器施設や原子炉施設を総称して、量子ビーム施設と呼びます。量子ビームは、特に先端研究や先進医療分野で利用されています（図 7-7）。

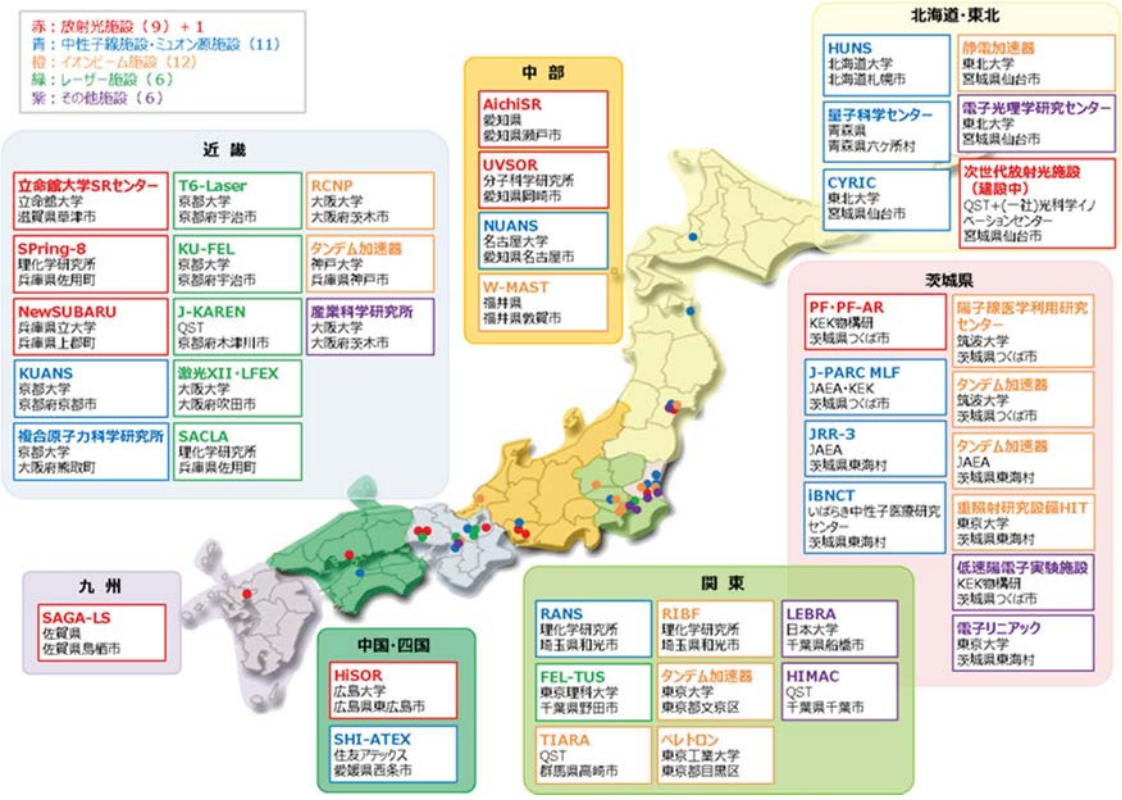


図 7-7　我が国にある主な量子ビーム施設

（出典）文部科学省

(1)　量子ビームを利用した先端研究

中性子線ビーム、放射光、RI ビームが利用され、数多くの新しい発見や新技術の開拓が行われています。

①　中性子線ビームの利用

大強度パルス中性子源[13]を使ったビーム利用実験が可能な代表的な施設に大強度陽子加速器施設 J-PARC[14]の物質・生命科学実験施設（MLF[15]）があります。

J-PARC を利用した研究の一例として、電池の研究開発があります。電池の大容量化、劣化、安全性に関する研究開発は、電気自動車や再生可能エネルギーの普及のために重要な役割を果たします。電気自動車の普及が進めば、移動に用いられている化石燃料の削減をもたらし、地球温暖化対策にも貢献します。

また、MLF には、ミュオンを取り出して利用する装置があります。ミュオンは電子と同じ仲間の素粒子で、電磁的な相互作用をすることから、物質の磁気的な性質や物質中に存在する微量の水素原子の存在状態の探索等の物質研究において非常に有効なツールとなります。ミュオンの特性の一つであるスピンを利用した方法（μSR（ミュオンスピン回転・緩和・共鳴法））は、物性研究のための重要な実験手段となっています（図 7-8）。

図 7-8　J-PARC MLF の実験装置配置概要

（出典）J-PARC センター提供資料

[13] 100 万分の 1 秒等の短い時間（パルス）に極めて大きなエネルギーを持った（大強度）中性子を繰り返し発生させる装置［38］。

[14] Japan Proton Accelerator Research Complex

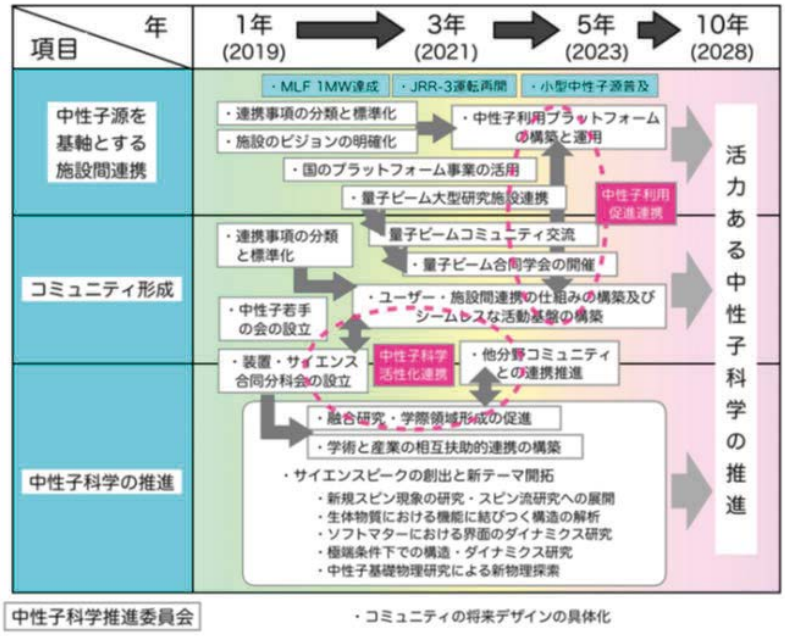
[15] Materials and Life Science Experimental Facility

コラム　～日本中性子学会の取組～

世界的に、中性子線を利用した研究開発や産業への応用が活発になってきています。我が国は、BNCT や電池の研究開発等で世界をリードしてきましたが、各国も新たな研究施設等を計画しており、世界的な競争が激化していくことが予想されます。我が国がこれまでリードしてきた分野を今後も牽引し、新たな分野でイノベーションを起こすためには、産業への応用を見据え、中性子線を利用できる施設が学術研究だけでなく民間にも広く利用されることが望まれます。

日本中性子科学会は 2018 年 7 月 2 日に「ロードマップ検討特別委員会提言と評議員会の決定に関する報告書」の中で、中性子科学のあるべき姿と現状の課題及び課題を解決する方針についての議論の結果を示しました［20］。この議論は、大学や研究機関に所属する研究者によって行われましたが、今後は、学術界だけでなく国や産業界も加わることで、より具体的かつ実現可能な戦略と体制が形成されることが期待されます。

これに先駆け、我が国における加速器駆動中性子源の研究を基礎とした、中性子ビームの実用技術及び産業実用までを含めたコンソーシアム形成までを指向する総合的なネットワークとして設立された日本加速器中性子源協議会（JCANS[16]）は、これまでの大学や研究機関を中心とした学術部会のほかに、産業界への普及を目的として産業部会を立ち上げることにより、その活動の幅を広げています。



日本中性子科学会によって示された中性子科学推進ロードマップ

（出典）日本中性子科学会「ロードマップ検討特別委員会提言と評議員会の決定に関する報告書」（2018 年）［20］

[16] Japan Collaboration on Accelerator-driven Neutron Sources

②　放射光の利用

大型放射光源を使ったビーム利用実験が可能な代表的な施設に、大型放射光施設 SPring-8[17]があります。SPring-8 は、微細な物質の構造や状態の解析が可能な世界最高性能の放射光施設であり、生命科学、環境・エネルギーから新材料開発まで広範な分野において、先端的・革新的な研究開発に貢献しています。さらに、X 線自由電子レーザー[18]（XFEL[19]）施設 SACLA[20]は、非常に高速のパルス光を利用できるため、X 線による試料損傷の影響の低減が期待できるとともに、物質を原子レベルの大きさで、かつ非常に速く変化する様子をコマ送りのように観察することが可能です。

高性能永久磁石の製造では、従来、資源が中国等に偏在する貴重な希土類元素が用いられています。SPring-8 における比較的波長の長い X 線（軟 X 線）ナノビームを用いた磁石の結晶構造解析は、希少元素を用いない高性能永久磁石の開発のための成果を上げています。

また、粘土鉱物へのセシウム取り込みメカニズム解明を目的として、極めて短い時間間隔で分析が可能になる X 線吸収微細構造（XAFS[21]）測定により、セシウム取り込み過程を追跡する福島環境回復研究が行われています。さらに、東電福島第一原発からの燃料デブリ取り出し作業に向け、燃料デブリの形成過程を詳細に解明するためにも放射光が用いられています。この結果は、東電福島第一原発の安全な廃炉作業を支援しています。

SACLA の研究成果として、光合成による水分解反応を触媒する光化学系Ⅱ複合体（PSII[22]）の構造解明研究があります。この研究成果は、人工光合成開発への糸口となるもので、エネルギー、環境、食糧問題解決へ貢献するものです（図 7-9）［21］。

SPring-8 では、学術研究利用のみならず、エレクトロニクス、環境・エネルギー、素材（金属、高分子）、創薬・生活用品等の産業利用も活発に実施されています。これらの産業利用には、約 150 社、延べ約 2,800 人（2019 年度実績）が携わっています（図 7-10）。

---

[17] Super Photon ring-8 GeV

[18] X 線でのレーザーを作る方式のひとつ。従来の物質中での発光現象を使う方式ではなく、電子を高エネルギー加速器の中で制御して運動させ、それから出る光を利用する方式で、原子からはぎ取られた自由な電子を用いて X 線レーザーを作ることから、X 線自由電子レーザーと呼ばれます［39］。

[19] X-ray Free Electron Laser

[20] SPring-8 Angstrom Compact free electron LAser

[21] X-ray Absorption Fine Structure

[22] Photosystem II

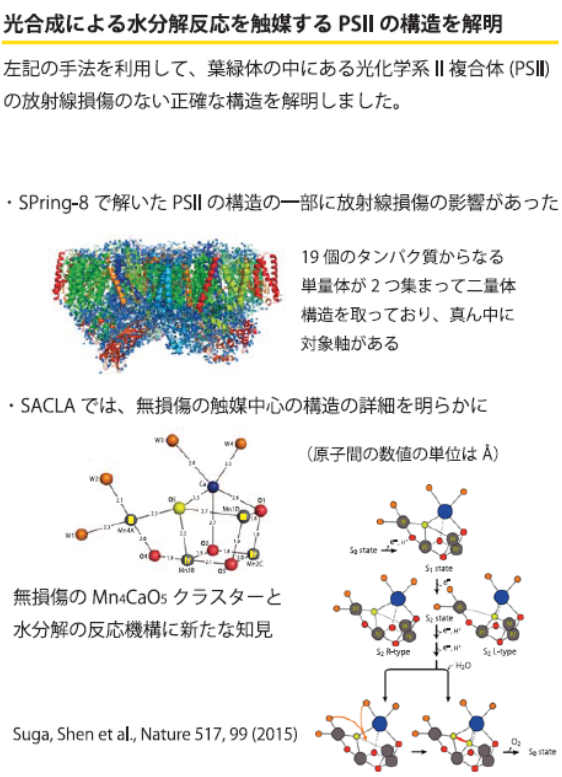


図 7-9　SACLA の研究成果

(出典)理化学研究所放射光科学研究センター「X 線自由電子レーザー施設 SACLA 利用のはじまり」[21]

図 7-10　SPring-8 の産業利用

(出典)理化学研究所提供資料

コラム　～官民地域パートナーシップによる次世代放射光施設の推進～

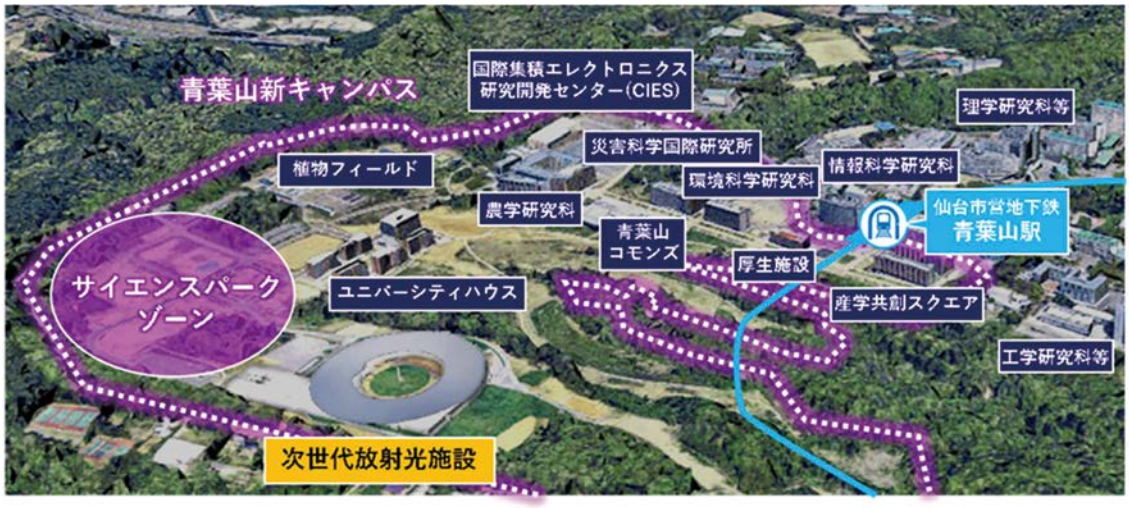
最先端の科学技術は、物質の「構造解析」に加えて「機能理解」が重要となっており、物質表面の電子状態の変化を追える高輝度の軟 X 線利用環境の早期整備が求められています。東北にある 7 つの国立大学（秋田大学、岩手大学、東北大学、弘前大学、福島大学、宮城教育大学、山形大学）等を中心に東北地方への高輝度放射光施設の設置が提唱されるなど、施設の設置への機運が高まる中、2018 年 1 月に、文部科学省の有識者会議において、学術、産業ともに高い利用が見込まれる次世代放射光施設（軟 X 線向け高輝度 3GeV 級放射光源）を官民地域パートナーシップにより早期に整備することが必要であるとの報告が取りまとめられました。

これを基に、文部科学省は、量研を施設の整備・運用を進める国の主体とし、2018 年 7 月、一般財団法人光科学イノベーションセンター（代表機関）、宮城県、仙台市、東北大学、一般社団法人東北経済連合会の 5 者を地域･産業界のパートナーとして選定しました［22］。

2019 年 3 月には、東北大学青葉山新キャンパスにおいて施設建屋の造成工事が開始され、現在、2023 年度中の完成を目指して建屋工事や機器の製作が進められています。

同施設は、コンパクトで高性能な放射光施設であり、スピントロニクス材料など新規デバイス開発に有効な電子状態分析や、燃料電池、リチウムイオン電池、ヘルスケア等の研究開発においてニーズが高まっている 10 ナノメートル以下での非破壊観察を可能とするため、産業界からも研究開発への利用に高い期待が寄せられています［23］。

次世代放射光施設の完成イメージ



東北大学青葉山新キャンパス内の立地

（出典）一般財団法人光科学イノベーションセンター提供資料

③　RI ビームの利用

RI ビームを使ったビーム利用実験が可能な代表的な施設に、国立研究開発法人理化学研究所（以下「理化学研究所」という。）にある「RI ビームファクトリー」があります。RI ビームファクトリーは、水素からウランまでの全元素の RI を、世界最大の強度でビームとして発生させる加速器施設です（図 7-11）。

RI ビームファクトリーを利用した研究成果として、2015 年 12 月には、本施設で合成に成功した原子番号 113 の元素が新元素であることが国際機関により正式に認定され、理化学研究所を中心とする研究グループが新元素の命名権を獲得、2016 年 11 月に元素名を「ニホニウム（nihonium）」、元素記号を「Nh」とすることが国際純正・応用化学連合（IUPAC[23]）にて正式決定されました。

更に 2017 年 12 月には、73 種類の新たな RI が発見されたことが発表されました。2010 年以降、理化学研究所では 132 種類の新たな RI を発見しており、同様の研究を行っている米国、英国、ロシア、ドイツよりも多くの発見数を記録しています［24］。

図 7-11　RI ビームファクトリー超伝導リングサイクロトロン

（出典）理化学研究所仁科加速器研究センター「RI ビームファクトリーの施設」［25］

[23] International Union of Pure and Applied Chemistry

(2)　量子ビーム・RI を利用した先進医療

中性子線ビーム、粒子線、α線は、腫瘍の効果的な治療に利用されています。今後、更なる利用の進展が期待される分野の一つです。また、放射線治療の分野では、医師のほか、医学知識を有する理学や工学の専門家である医学物理士等との協力が求められます。α線治療で利用する RI の製造や抽出過程においても、医学・理学・工学の分野の技術者間での密接な連携が必要になります。

①　中性子線ビーム利用

医療分野で中性子線を利用したものに、ホウ素中性子捕獲療法（BNCT）があります。BNCT では、悪性腫瘍に集積する薬剤に、中性子と核反応（捕獲）しやすいホウ素を添加します。薬剤が集積した箇所を中心に中性子線を照射すると、中性子は薬剤の集積していない正常な細胞を透過しますが、薬剤の集積した悪性腫瘍の細胞では、薬剤中のホウ素が中性子を捕獲します。中性子を捕獲したホウ素は、悪性腫瘍の中でリチウム 7 とα線を放出します。α線は飛ぶ距離が短いため、悪性腫瘍の細胞のみを選択的に破壊することができる仕組みです。これまで、原子炉を用いた BNCT の臨床試験も数多く実施されてきましたが、今後、病院に近接して設置できる加速器から得られる中性子を利用した治療に期待が高まっています（図 7-12）。

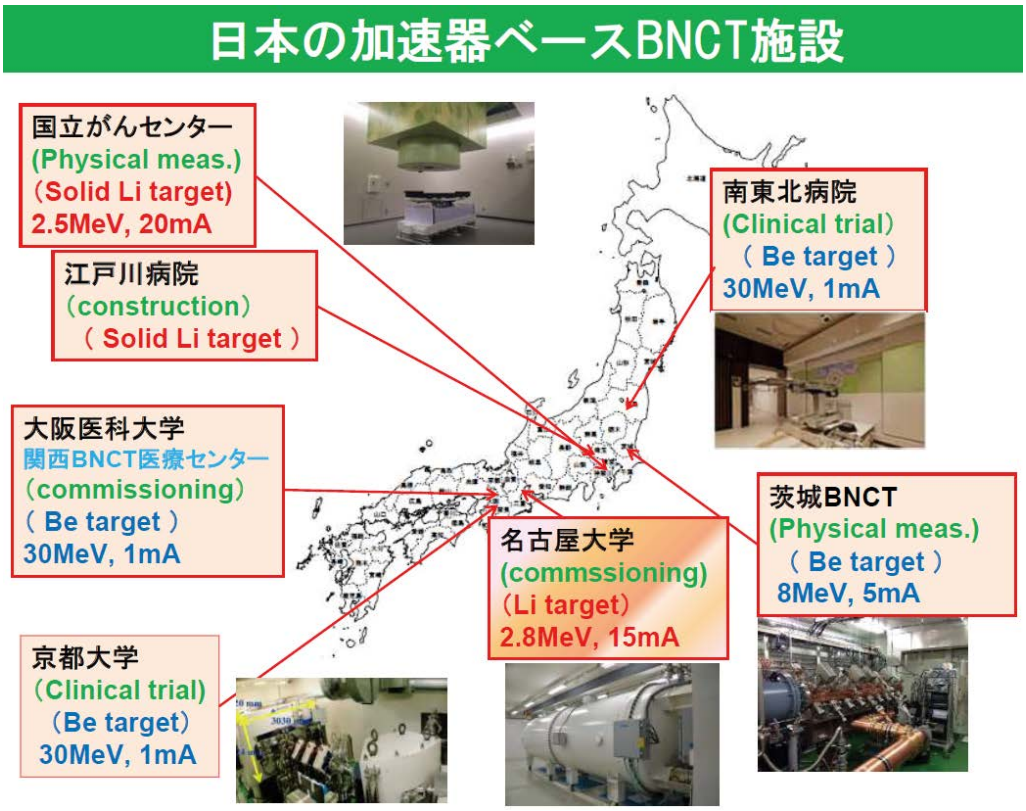


図 7-12　我が国の加速器を用いた中性子源

（出典）第 8 回原子力委員会資料第 1 号 名古屋大学鬼柳善明「日本の中性子利用研究と施設連携」（2019 年）［6］

②　粒子線利用

一般に重粒子線治療には、炭素イオンを加速した炭素イオン線が利用されます。エネルギーの大きな粒子が物質中を通過する場合、陽子のような軽い粒子では散乱して進行方向が変わりますが、重粒子線ではそれが比較的少なく、同じ物質であればより遠くまで飛びます。また、止まる直前で周囲に与えるエネルギーがピークになる性質があります。

我が国では、1994 年に当時の放射線医学総合研究所（現量研）に医療用加速器（HIMAC[24]）が完成し、重粒子線（炭素イオン線）による臨床試験が始まりました。現在では、様々な腫瘍の治療に用いられています。

世界の重粒子線治療施設は、稼働中が 12 施設、建設中が 5 施設、計画中が 13 施設です。稼働中の施設数は、我が国が世界全体の半数を占めており、欧州、中国が続いています。米国には現在稼働している施設はありませんが、4 施設の計画が進行中です（図 7-13）。

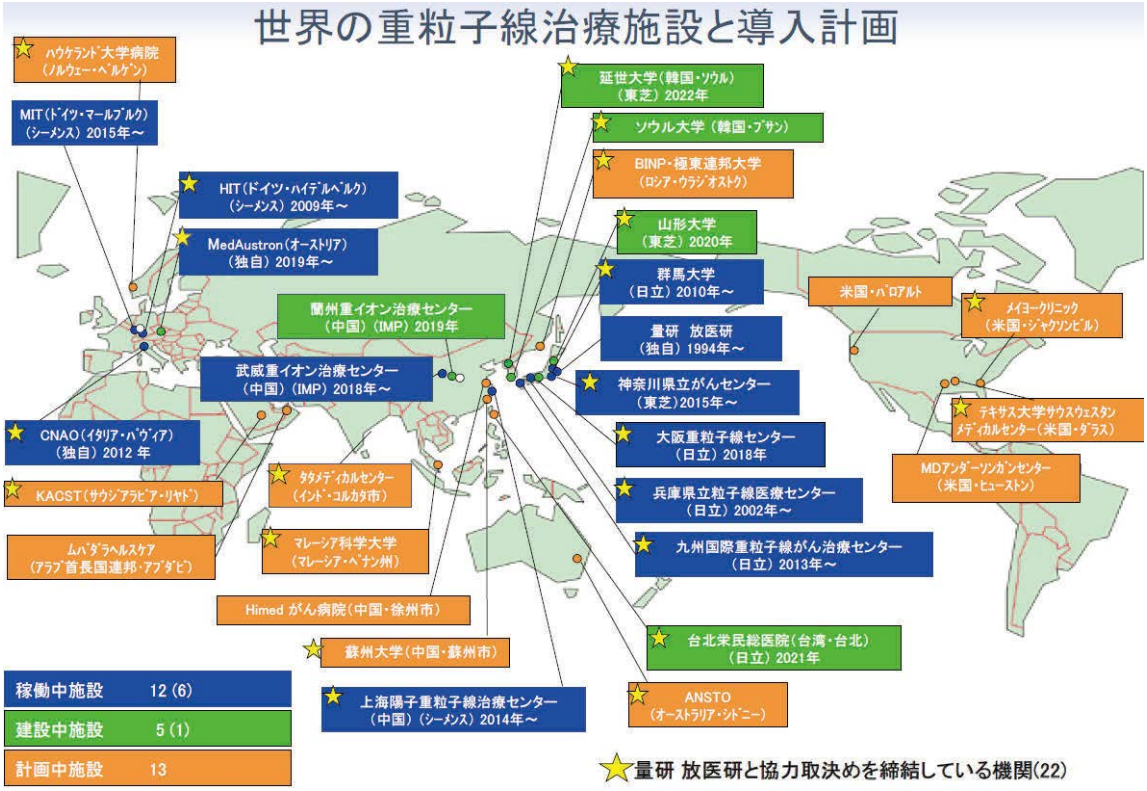


図 7-13　世界の重粒子線治療施設と導入計画

（出典）第 6 回原子力委員会資料第 2 号 中野隆史「日本での RCA の活動と重粒子線がん治療の現状」(2020 年) [26]

世界的にみて稼働中施設が 12 施設と少ない原因の一つは、治療装置（主に加速器の部分）が大型であることが挙げられます。そのため、治療装置の小型化が進められており、2010 年には群馬大学に比較的小型の第 2、第 3 世代の装置が導入され、治療が開始されました。現

[24] Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba

在、より小型の「量子メス」と呼ばれる治療装置の実現を目指し、更なる加速器技術の研究開発が行われています（図 7-14）。

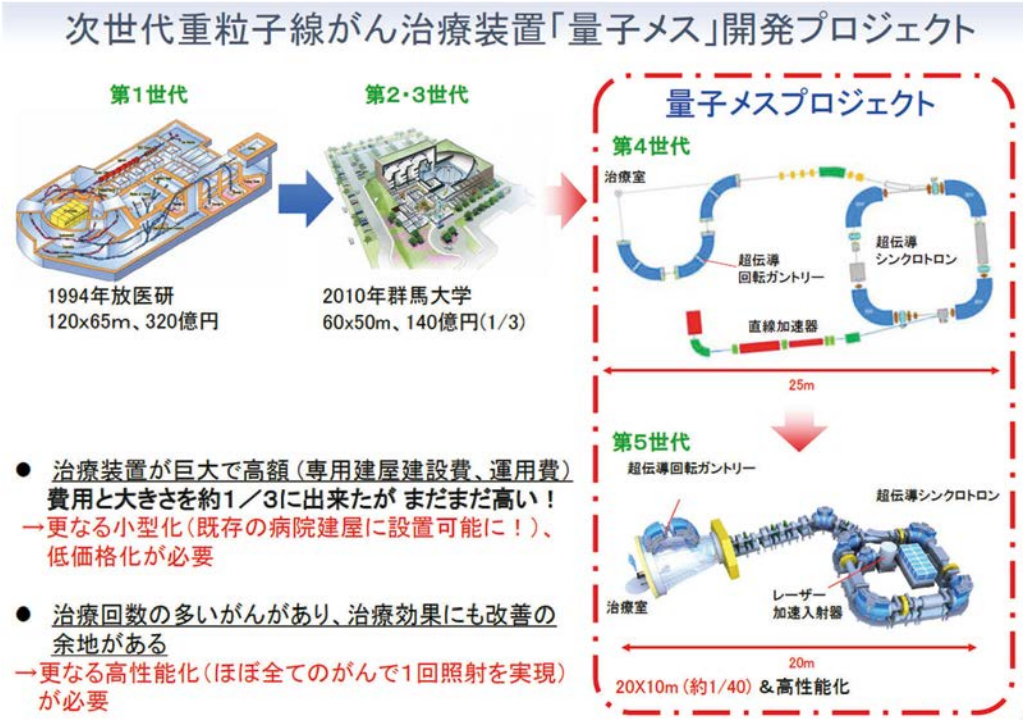


図 7-14　重粒子線治療装置の変遷

（出典）第 6 回原子力委員会資料第 2 号 中野隆史「日本での RCA の活動と重粒子線がん治療の現状」(2020 年) [26]

また、水素の原子核を加速した陽子線を利用した陽子線治療[25]も、様々な腫瘍の治療に用いられています。

③　α線利用

近年注目されているのが、α線を放出する RI を使用した治療です。α線を放出する RI を利用する利点としては、より短い距離でエネルギーを放出して止まるため、がん細胞周辺にある正常な細胞への影響が少なく、また比較的短い寿命のものも多いため、治療時間を短縮して生活の質（QOL[26]）の向上につなげられることが挙げられます。α線を放出する RI を用

[25] 令和 2 年 7 月 1 日現在、陽子線治療を実施している医療機関は全国に 17 施設（国立がん研究センター東病院、兵庫県立粒子線医療センター、静岡県立静岡がんセンター、筑波大学附属病院、南東北がん陽子線治療センター、メディポリス国際陽子線治療センター、福井県立病院、名古屋市立西部医療センター、北海道大学病院、慈泉会相澤病院、津山中央病院、禎心会札幌禎心会病院、伯鳳会大阪陽子線クリニック、兵庫県立粒子線医療センター附属神戸陽子線センター 、成田記念陽子線センター 、高清会高井病院 、京都府立医科大学附属病院）あります。

[26] Quality of Life

いた核医学治療は世界的にも着目されており、ラジウム 223（Ra-223）、アクチニウム 225（Ac-225）、ビスマス 213（Bi-213）、アスタチン 211（At-211）等を用いた臨床研究、標的アイソトープ治療（TRT[27]）、その中でもα線放出核種を用いた標的α線治療（TAT[28]）が各国で行われています（図 7-15）。

RI	$T_{1/2}$	臨床利用	供給
Ra-223	11 d	Xofigo FDA (2013) EMA (2013) PMDA (2016) 骨転移のある去勢抵抗性前立腺がん 52カ国で承認(2017)	
Ac-225	10 d	メラノーマ (P. I) グリオーマ (P. I) 白血病 (P. I/II) 前立腺 乳 卵巣 多発性骨髄腫 神経内分泌 +	
Bi-213	0.75 h	脳腫瘍 白血病	
At-211	7.2 h	白血病 卵巣	in-house

図 7-15　標的アイソトープ治療に利用される主なα線放出 RI

（出典）第 22 回原子力委員会資料第 1 号 量研「医用 RI の国際的利用並びに量研機構での放射性薬剤開発について」(2019 年) [27]

[27] Targeted Radionuclide Therapy
[28] Targeted Alpha Therapy

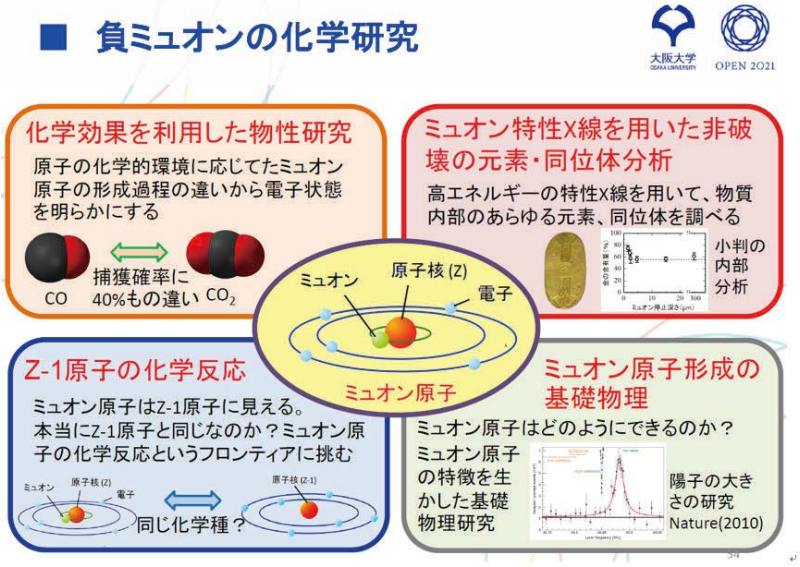
コラム　～放射化学について～

放射化学とは、元素や化合物を対象とする化学の枠を放射性元素や放射性核種にまで広げ、核現象や放射線の化学効果までも含めて研究する、物理学と化学の境界に位置する学問分野です。我が国では、原子核の構造や核反応のメカニズムを化学的視点から研究する核化学も含めた広い分野を意味します。人工元素の製造、核データの研究、加速器化学、同位体分離と濃縮、放射化分析や放射能分析、RI 製造と標識化合物の合成、超ウラン元素や超重元素の研究等があり、原子力をはじめ物質科学、宇宙科学、地球科学、考古学（年代測定等）、環境科学、生命科学等との接点があります［28］。

今後、放射化学の知見を得て更に発展していくことが期待される学術領域としては、加速器や量子ビーム等も利用する核医学や核鑑識等が挙げられます［29］。

東電福島第一原発事故の際には、環境中に放出されたセシウム等の放射性物質の動態調査において、放射化学が蓄積してきた知見や手法等が大きく貢献しました。例えば、セシウムの大気中への拡散と沈着、それらによる人の被ばく線量評価、土壌の汚染状況や土壌から農作物等へのセシウムの移行評価、河川や海洋中の濃度測定や評価等、放射性物質と人及び環境の影響に関するほぼ全てのことが関係しています。また、東電福島第一原発事故由来の環境放射能測定の結果は、東電福島第一原発での炉心溶融のメカニズムを判断する際の重要な手がかりを示唆するものです。

放射化学における新領域として、ミュオンによる新規元素分析法及びα線核種によるがん治療があります。ミュオンとは、正及び負の電荷を持つ質量が電子の 200 倍の粒子です。



負ミュオンの化学研究

（出典）第 10 回原子力委員会資料第 1 号　篠原厚「放射化学とは　現状と課題、そして未来へ」(2020 年) [30]

コラム　～基礎的知見に基づく天然鉱物・微生物を利用した放射性核種除去法の開発～

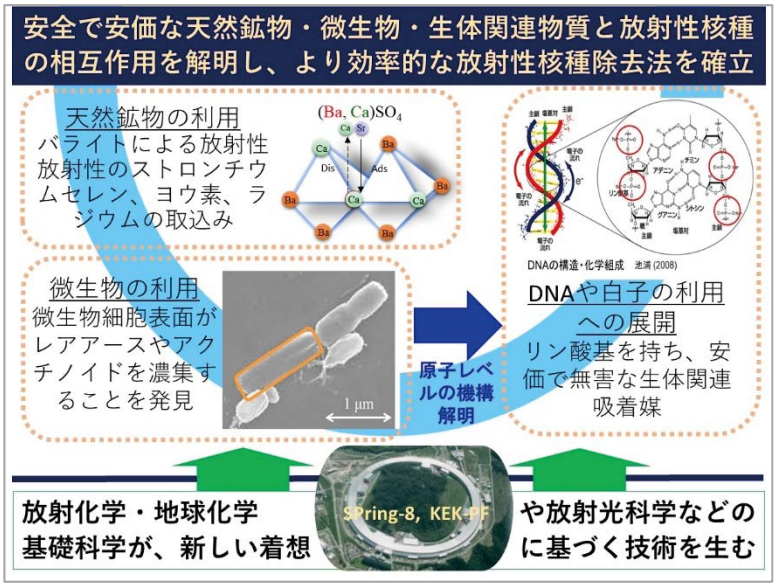
放射性核種を効率的に除去・固定する手法の開発は、東電福島第一原発の汚染水処理やウラン鉱山周辺地下水のウランやラジウムの除去等、様々な場面において重要です。また、手法そのもののエネルギー消費が高くないことや、利用する化学物質が環境に負荷を与えないことも重要です。これらをクリアする方法として、天然に存在する物質や微生物で放射性核種を高効率で除去できるようになれば、SDGs の観点からも望ましいと考えられます。

硫酸バリウム（バライト）は天然に存在する鉱物で、高温高圧でも安定かつ無害な物質です。イオンサイズが大きいため、東電福島第一原発事故でも問題になっている海水中放射性ストロンチウムや除去困難なセレンやヨウ素酸の除去等にも有効で注目されています。放射光施設を用いた X 線吸収微細構造（XAFS）分析により、これらの元素がバライト結晶中に安定に取込まれていることが確認され、濃集・除去後もバライト中に安定に保持できることがわかっています。

また、近年の研究で、放射性廃棄物地層処分において処分容器内に緩衝材として利用される粘土鉱物は、他のイオンを還元する性質を持ち、万が一ウラン等が漏洩しても粘土鉱物によって還元され不溶性のウランにして固定化する機能を持つことが分かってきています。

そのほか、様々な微生物（人体に安全な種）が持つ細胞壁を利用して、レアアースや+3 価のアクチノイド[29]を除去することができます。XAFS がもたらす原子レベルの情報から、この手法で鍵となるのは細胞表面のリン酸基であることが特定され、DNA やサケ白子による+3 価イオンの除去等のユニークな方法が開発されており、今後のアクチノイドへの応用も期待されます。このように、基礎科学的手法によるメカニズム解明は、全く新規の工学的手法を生むブレークスルーになり得ます。

放射光等の基礎的手法の助けを借りながら、環境負荷の小さな放射性核種の除去法の開発が進められており、工学的分野と化学（放射化学・物理化学・地球化学）や放射光科学等の基礎科学分野との連携が今後とも重要になります。



基礎科学的知見により得られる革新的なアイディアによる新しい放射性核種の除去・固定法の開発

（出典）東京大学　高橋嘉夫（2020）

[29] 原子番号 89 から 103 までの元素の総称。アメリシウムやキュリウム等が含まれる。