

第7章 放射線・放射性同位元素の利用の展開

7-1 放射線利用に関する基本的考え方と全体概要

放射線・放射性同位元素（RI¹）の利用（以下「放射線利用」という。）は、原子力エネルギー利用と共通の科学的基盤を持ち、工業、医療、農業を始めとした幅広い分野において社会を支える重要な技術となっています。

放射線には、アルファ線（ α 線）、ベータ線（ β 線）、エックス線（X線）、中性子線、重粒子線等の様々な種類があり、それぞれ異なる性質を持ちます。また、放射線を発生する機器やものにも、RI、加速器、原子炉等の様々なタイプがあります。医療機関、研究機関、教育機関、民間企業等では、利用目的や手段に応じてこれらを適切に使い分けています。

放射線発生装置等の研究開発の進展により放射線・RIの活用範囲は広がりを見せており、分野間連携を促進し、国や大学、研究機関、民間企業が連携してオールジャパン体制で取り組んでいくことが今後更に求められています。

(1) 放射線利用に関する基本的考え方

放射線は生体組織に対して過度に照射すると障害をもたらしますが、図 7-1 に示すような特性を有しています。これらの性質を産業や医療、学術研究等に幅広く活用することにより、国民生活の水準向上等に大きく貢献しています。

原子力利用に関する基本的考え方では、放射線・RIの活用の発展により、これまで想定されていなかった領域を含め、イノベーションが創出されることへの期待が示されています。また、2021年6月に閣議決定された「成長戦略フォローアップ」では、最先端技術の研究開発を加速するため、試験研究炉等を使用したRIの製造に取り組むことが示されました。このような状況を踏まえ、2021年11月から、原子力委員会の下で「医療用等ラジオアイソトープ製造・利用専門部会」が開催されました。同部会では、アクションプランの策定に向けて、医療用を始めとするRIの製造・利用推進に係る検討を進めました²。

- ◇ 物質を透過するため、物質や生体の内部を細部まで調べることができる。
- ◇ 局所的にエネルギーを集中させ、材料の加工や特殊な機能の付与ができる。
- ◇ 細菌やがん細胞等に損傷を与えて、不活性化することができる。
- ◇ 化学物質等に照射して別の物質に変えることができる。

図 7-1 放射線の特性

(出典)内閣府作成

¹ Radio Isotope

² 2022年5月31日、「医療用等ラジオアイソトープ製造・利用推進アクションプラン」を原子力委員会決定。

(2) 放射線の種類

放射線には、電離放射線と非電離放射線の二種類があります。電離放射線は、原子や分子から電子を引き離しイオン化（電離）する能力を持ちます。電離放射線には、 α 線、 β 線及び陽子線のように電荷を持った粒子線や、中性子線のような電荷を持たない粒子線、X線やガンマ線（ γ 線）のような電磁波等、様々な種類があります。一方、非電離放射線は、電離放射線のような相互作用をしない可視光線やマイクロ波等です。一般的に、放射線というと電離放射線を指します（図 7-2）。

多くの放射線は、物質に当たるときや物質中を透過するとき、物質の分子や原子と相互作用します。その相互作用は放射線の種類によって異なり、例えば、X線は物質を通り抜ける能力が高い、 α 線は物質内部で止まる際に局所的・集中的にエネルギーを与える、といった特徴があります。このような特徴を生かし、様々な放射線利用が行われています。

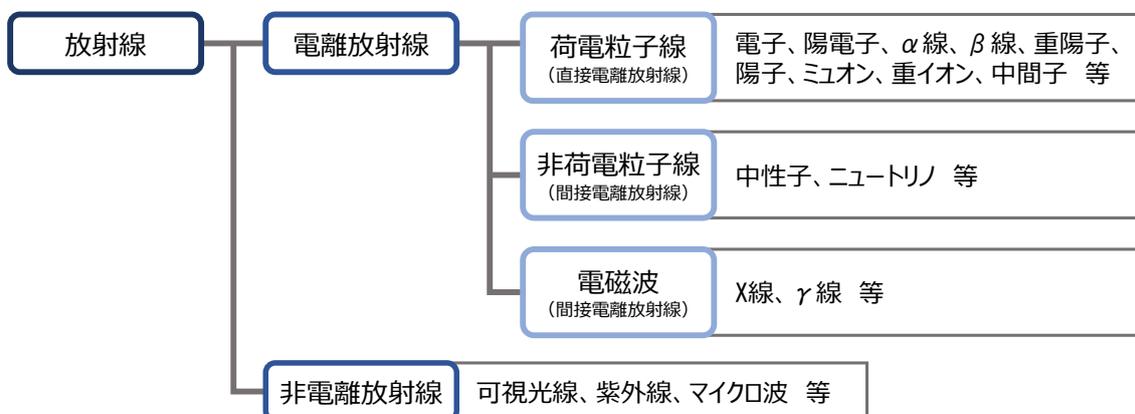


図 7-2 放射線の種類

（出典）地人書館 中村尚司著「放射線物理と加速器安全の工学」（1995 年）、環境省「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料 令和 2 年度版」（2021 年）等に基づき作成

(3) 放射線源とその供給

放射線を発生する機器やものには、RI、加速器、原子炉等、様々なタイプがあり、それぞれから得られる放射線の種類にも特徴があります。これらを目的や手段に応じて使い分けて、効果的に放射線利用が行われています。

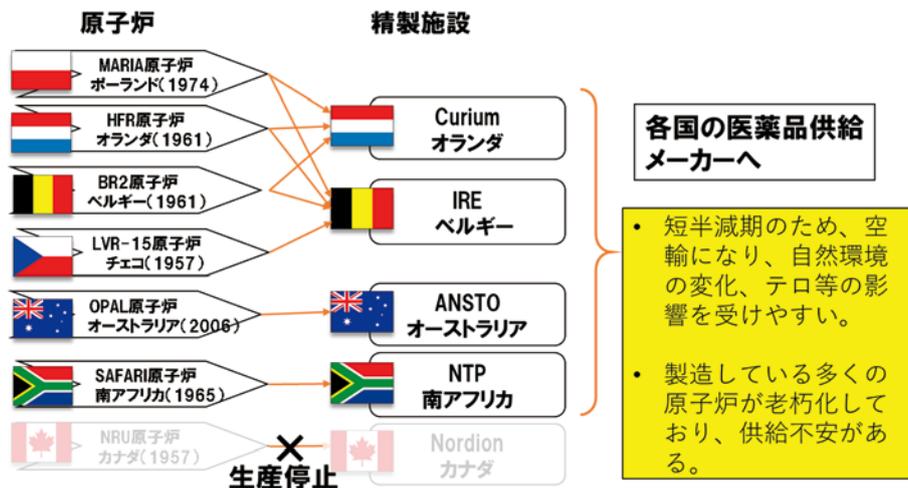
① 放射性同位元素 (RI)

RI は、それ自体が放射線源となります。RI は原子核が不安定であるため、より安定な状態に移行しようとして別の原子に変わる放射性崩壊を起こすことがあります。その際に放出される放射線 (α 線、β 線、γ 線、中性子線) が利用されています。天然に存在する RI の利用は効率が低いため、原子炉や加速器を用いて RI を人工的に製造しています。

原子炉での RI 製造は、原子核の核分裂反応あるいは中性子を吸収する反応により行われます。我が国で RI 製造・供給を行うことのできる原子炉 (研究炉) は、過去に JRR-3³、材料試験炉 (JMTR⁴)、京都大学研究用原子炉 (KUR⁵) の 3 基ありました。このうち、JMTR は新規規制基準対応のための耐震工事費用等を勘案し廃止が決定されましたが、KUR は 2017 年に、JRR-3 は 2021 年 2 月にそれぞれ運転再開しました⁶。

加速器での RI 製造は、加速された荷電粒子 (陽子、α 線等) をいろいろな試料に照射することにより行われます。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。) の RI ビームファクトリーでは、様々な加速器を用いた RI 製造が行われており、公益社団法人日本アイソトープ協会を通じて国内の大学や研究機関に頒布されています。

我が国では、主要な RI 医薬品のテクネチウム 99m (Tc-99m) の原料であるモリブデン 99 (Mo-99) の全量を海外から輸入しており、製造に用いられる研究炉の老朽化や故障、供給元からの輸送トラブル等の課題を抱えており、供給が不安定な状況です (図 7-3)。そのため、研究機関や民間企業において、原子炉や加速器による Mo-99 の国内製造に向けた取組が進められています。



(※) カナダNRU炉は、2016年10月末で⁹⁹Moの生産を停止

図 7-3 Mo-99 のサプライチェーン

(出典) 第 18 回原子力委員会資料第 1 号 公益社団法人日本アイソトープ協会 北岡 麻美「医療用 RI の需要と供給をめぐる状況について」(2021 年)

³ Japan Research Reactor No. 3

⁴ Japan Materials Testing Reactor

⁵ Kyoto University Research Reactor

⁶ 2022 年 4 月 5 日、京都大学は、2026 年 5 月までに KUR の運転を終了すると発表。

供給される RI の形態には、容器に密封された RI（密封 RI）と、密封されていない RI（非密封 RI）の二つがあります。密封 RI は民間企業への供給量が特に多く、非破壊検査や計測等の装置、医療機器や衛生材料の滅菌等に使用されています。また、非密封 RI は教育機関を中心に供給されており、分子生物学等の研究分野において、地表の物質の移動現象や動植物等の生体内における元素の移動現象を追跡できる、感度の高いトレーサーとして利用されています。

RI を使用する事業所は 2021 年 3 月末時点で 7,508 か所あり、機関別に見ると、民間企業が 4,471 か所、医療機関が 1,141 か所、研究機関が 408 か所、教育機関が 474 か所、その他の機関が 1,014 か所です（図 7-4）。民間企業では、化学工業、パルプ・紙製造業、鉄鋼業、電気機器製造業を始めとして、幅広い業種において使用されています（図 7-5）。

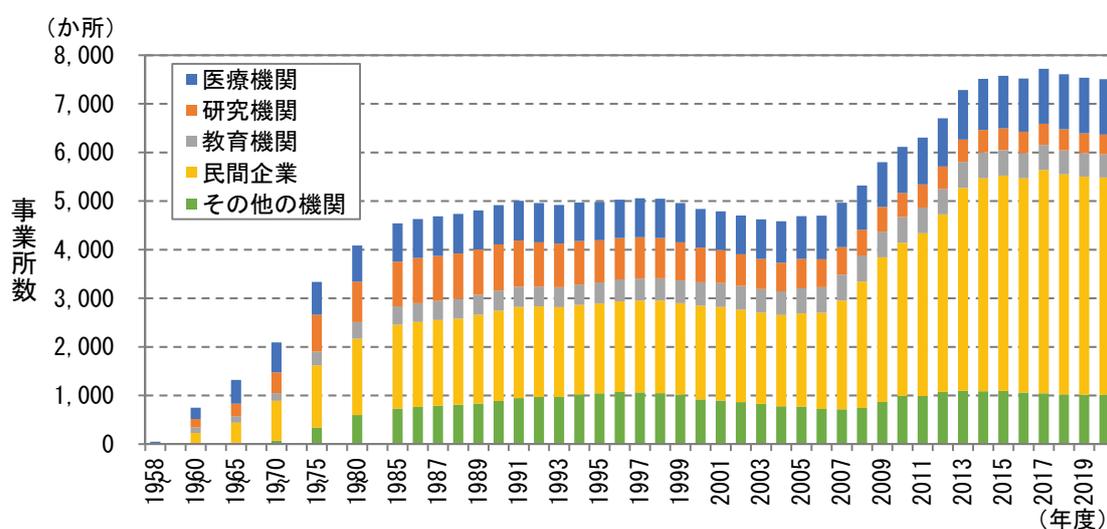


図 7-4 放射性同位元素を使用する事業所数の推移

(出典)原子力規制委員会「規制の現状 表 2 機関別使用事業所数の推移」に基づき作成

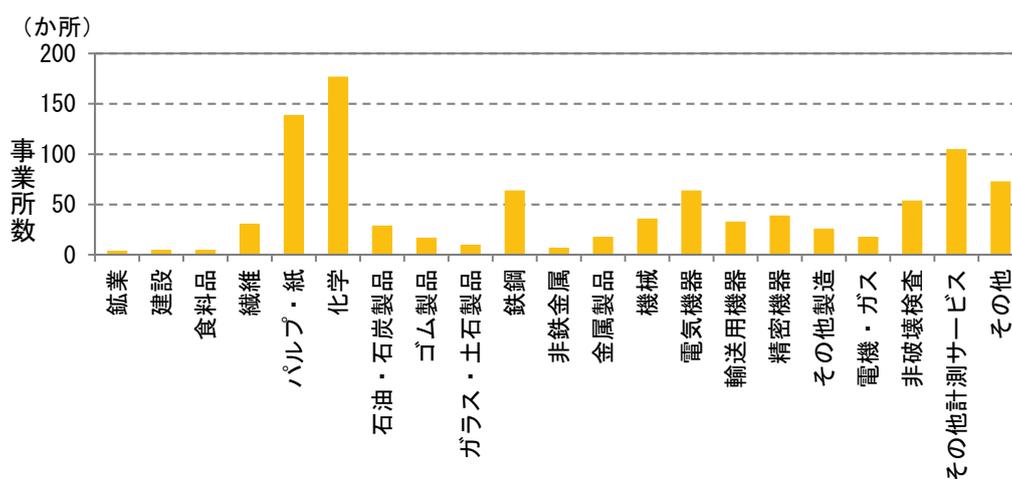


図 7-5 放射性同位元素を使用する民間企業の業種別事業所数 (2019年3月末時点)

(出典)公益社団法人日本アイントップ協会「放射線利用統計 2019 (第3版)」に基づき作成

② 原子炉

原子炉では、RI 製造以外にも、核分裂の際に放出される中性子が利用されています。核分裂により放出されるエネルギーを熱として取り出し動力源に用いるのが原子力発電であり、核分裂により放出される中性子を利用するのが研究炉です。研究炉では、中性子をビームとして炉心から取り出し、学術研究等に利用しています。

③ 加速器

加速器は、RI 製造以外にも、陽子、電子、炭素原子核等の粒子を光の速度近くまで加速して、エネルギーの高い電子線、陽子線、重粒子線の状態で取り出すことができます。粒子を加速する形状により、直線的に加速する線形加速器と、円軌道を描かせながら次第に加速する円形加速器の 2 種類に大別されます。例えば、円形加速器では、電子の加速により、様々な波長の電磁波が含まれる放射光を発生させることができます。放射光から、目的に応じて特定の波長の電磁波を取り出し、タンパク質の構造解析等に利用されています。

放射性同位元素等規制法の許可を受けて使用されている加速器（放射線発生装置）は、2019年3月末時点で1,747台です（図 7-6）。このうち1,310台は医療機関に設置され、がん治療等に利用されています。また、教育機関、研究機関、民間企業等でも利用されています。そのほか、放射性同位元素等規制法の規制対象とならない低エネルギー電子加速器、イオン注入装置等も民間企業等に多数導入され、幅広く利用されています。

なお、中性子源として用いる加速器には持ち運び不可能な大規模な装置が必要ですが、X線や電子線を発生する加速器は小型化・軽量化が進められ、利用対象が広がっています。

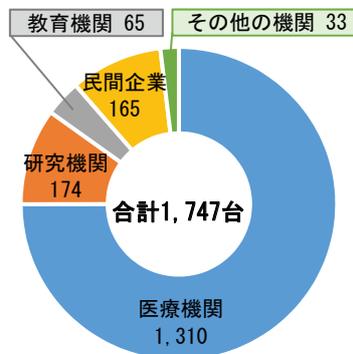


図 7-6 放射線発生装置の使用許可台数（2019年3月末時点）

（出典）公益社団法人日本アイソトープ協会「放射線利用統計 2019（第3版）」に基づき作成

④ その他（X線発生装置、レーザー発振器）

X線発生装置では、陰極と陽極の間に高電圧をかけ、陰極から出た熱電子が高速で陽極とぶつかったときにX線が発生します。X線は、レントゲンや非破壊検査等に利用されています。

レーザー発振器は、気体や固体の原子の電子エネルギーを変化させて取り出した光を増幅し、ほぼ単一の波長の電磁波であるレーザー光として発振します。指向性が優れている、エネルギー密度が高いなどの理由から、レーザー溶接や歯の治療等に利用されています。

コラム

～JRR-3 を用いた医療用 RI 製造の現状と今後の可能性～

JRR-3 は世界トップレベルの高性能研究炉として中性子ビーム実験や中性子照射（RI 製造）に利用されており、隣接する RI 製造棟では大量の RI 製造が可能です。RI 製造棟に設置されている詰替用ホットセル⁷は JRR-3 と輸送管で直結しており、JRR-3 で照射した試料を遠隔操作によってセル内に転送することができます。

JRR-3 では、密封小線源治療⁸用の RI として、金 198 (Au-198) とイリジウム 192 (Ir-192) を製造しています。東電福島第一原発事故後に JRR-3 が停止していた期間は、代替炉として海外の研究炉で照射した線源を輸入していました。しかし、輸送コストや照射料金の違いにより製造費が照射する炉によって大きく変動することや、事前に年間利用申込みを行う必要があり需要と供給のバランスを取りにくいこと等の影響がありました。JRR-3 が 2021 年 2 月に運転再開し、同年 7 月に供用運転を再開した後は、直ちに国内製造を再開しており、Au-198 は 70%、Ir-192 は 100%の国内製造率を目指しています。

また、JRR-3 は、現在では我が国で Mo-99 を製造可能な唯一の研究炉であることから、JRR-3 を使用した照射実験を実施し、照射手法の確立等の検討が進められています。今後、Mo-99 の国内安定供給を実現するためには、現在の JRR-3 の製造能力では国内需要の 20% から 30%にとどまること、高品質かつ大量の Mo-99 を扱うための設備が不足していること、RI 製造に携わったことのある研究者や技術者が減少していること等の中長期的課題の解決に向けた取組を進めていくことも重要です。

なお、2021 年 11 月に原子力機構は JRR-3 バーチャルツアー⁹を公開しました。JRR-3 の建屋内を、360 度パノラマ VR により見学することができます。



JRR-3

(出典) 第 22 回原子力委員会資料第 1 号 日本原子力研究開発機構「JRR-3 を用いた RI 製造」(2021 年)

⁷ 強い放射性物質を取り扱えるように十分な遮蔽を施した実験室等の一区画。

⁸ RI が封入された小さなカプセルを、腫瘍治療する臓器に直接挿入し、内部から放射線を照射する治療法。

⁹ <https://sv2.panocreator.net/viewerController?u=u8128980541&p=p6001226554>