

## 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（RI<sup>1</sup>）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（ $\alpha$ 線）、ベータ線（ $\beta$ 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、これらが適切に使い分けられています。

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。これらの性質を学術研究や産業利用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、2020年7月に閣議決定された「統合イノベーション戦略2020」においても、放射線・RIについては、先端的な科学技術と共通の科学的基盤を有する分野であり、今後は工学、医学、理学等の分野間連携を促進することや、複数の専門領域を融合させ、国や大学、研究機関だけでなく、民間企業も連携したオールジャパン体制で取り組むことを通じて、放射線等を戦略的かつ有効に活用していくことが求められるとされています。

- ◇ 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

<sup>1</sup> Radio Isotope

## (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、 $\alpha$ 線、 $\beta$ 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（ $\gamma$ 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、 $\alpha$ 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。

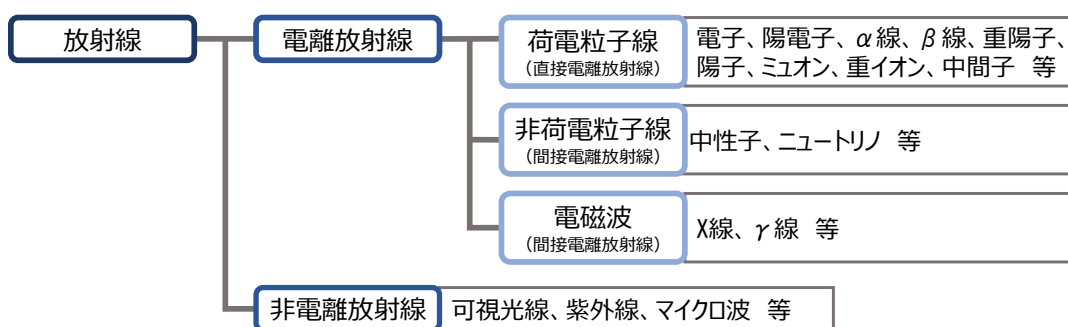


図 7-2 放射線の種類

(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 令和元年度版」(2020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（表 7-1）。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。

表 7-1 放射線発生装置（放射線源を含む）と得られる放射線

	RI	加速器	原子炉	X線発生装置	レーザー発振器
$\alpha$ 線	○	○			
$\beta$ 線	○	○			
$\gamma$ 線	○	○			
中性子線	○	○	○		
ニュートリノ	○	○			
ミュオン		○			
陽子線		○			
重粒子線		○			
放射光		○			
X線				○	
レーザー光					○

(出典) 原子力委員会研究開発専門部会加速器検討会「加速器の現状と将来」(2004年)等に基づき作成

## 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<sup>2</sup>-3、材料試験炉 (JMTR<sup>3</sup>)、京都大学研究用原子炉 (KUR<sup>4</sup>) の 3 基ありました。このうち、KUR は 2017 年に運転を再開しており、JRR-3 は耐震補強工事等を経て 2021 年 2 月に運転再開しました。なお、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。

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。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により、Mo-99 の入手が極めて困難になった時期がありました。このような状況を受けて、加速器による Mo-99 製造の実用化に向けた検討が進められています。

RI の利用には、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) の二つの形態があります。密封 RI は民間企業への供給量が特に多く (図 7-3 左)、非破壊検査や計測等の装置、医療機器や衛生材料の滅菌、医療機関におけるガンマナイフ装置<sup>5</sup>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 (図 7-3 右)、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。

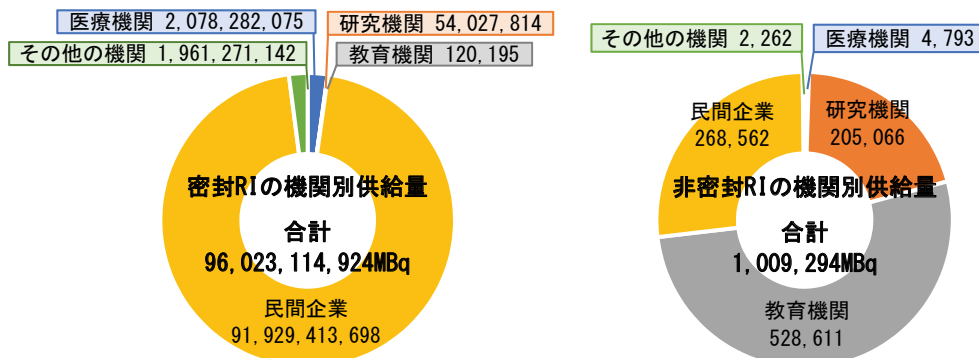


図 7-3 密封 RI (左) 及び非密封 RI (右) の機関別供給量 (2020 年度)

(出典)公益社団法人日本アイントープ協会「アイントープ等流通統計 2021(第 2 版)」(2021 年)に基づき作成

<sup>2</sup> Japan Research Reactor

<sup>3</sup> Japan Materials Testing Reactor

<sup>4</sup> Kyoto University Research Reactor

<sup>5</sup> 病巣部周囲の正常な組織を傷つけることなく、約 200 個のコバルト 60 (RI) の線源から出る γ 線を用いて、虫眼鏡の焦点のように病巣部に対して集中的に照射する治療法。ビームが集中する箇所のみがナイフで切り取られたかのように治療できることが、命名の由来。

RIを使用する事業所は2020年3月末時点で7,535か所あり、機関別に見ると、民間企業が4,487か所、医療機関が1,141か所、研究機関が407か所、教育機関が485か所、その他の機関が1,015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)。

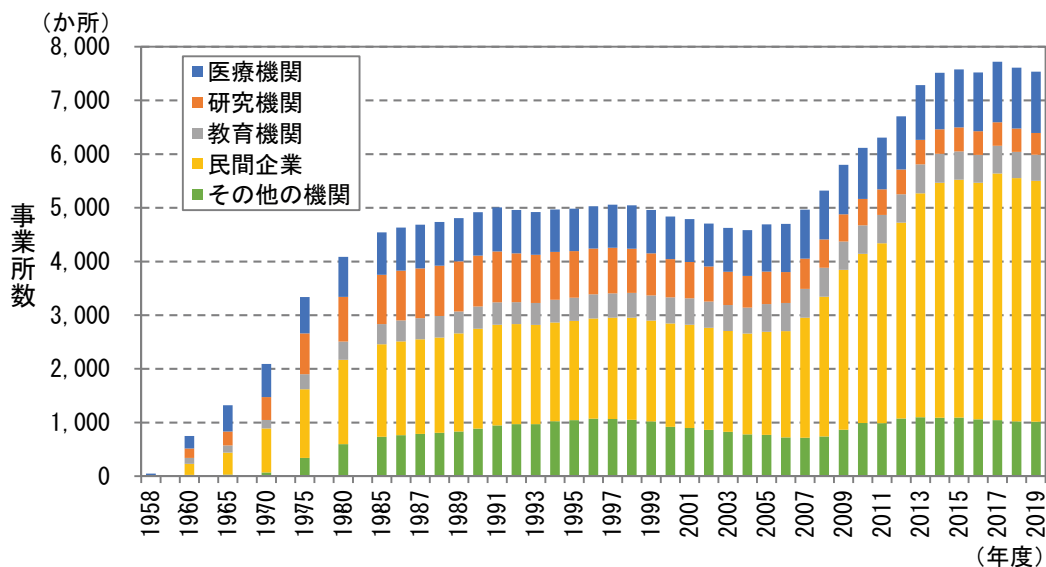


図7-4 放射性同位元素を使用する事業所数の推移

(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

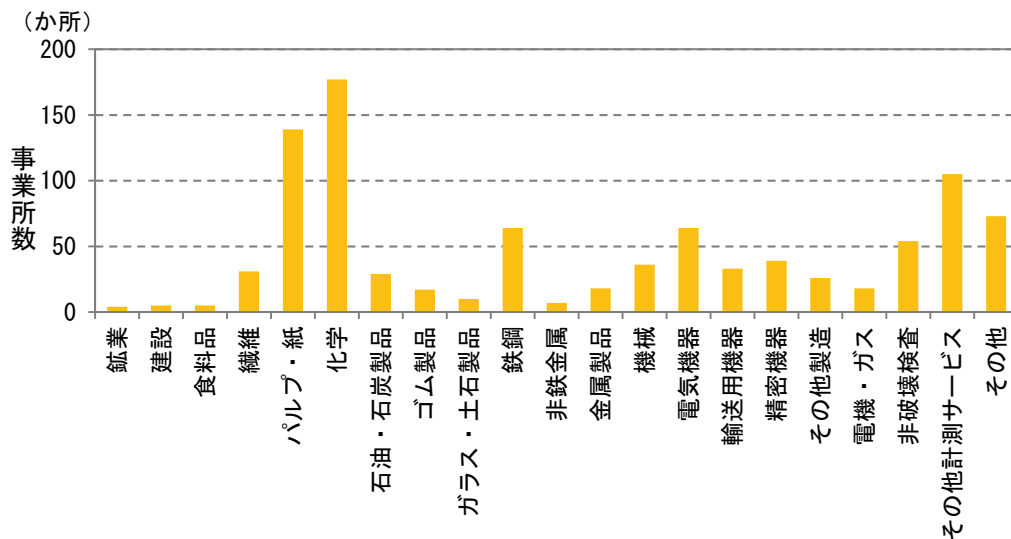


図7-5 放射性同位元素を使用する民間企業の業種別事業所数 (2019年3月末時点)

(出典)公益社団法人日本アイソトープ協会「放射線利用統計2019」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。

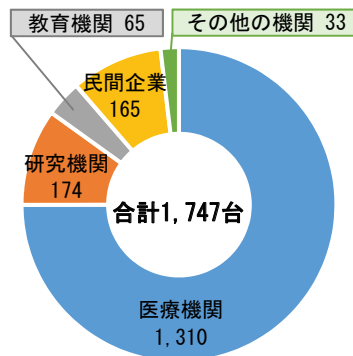


図 7-6 放射線発生装置の使用許可台数（2019年3月末時点）

（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」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。

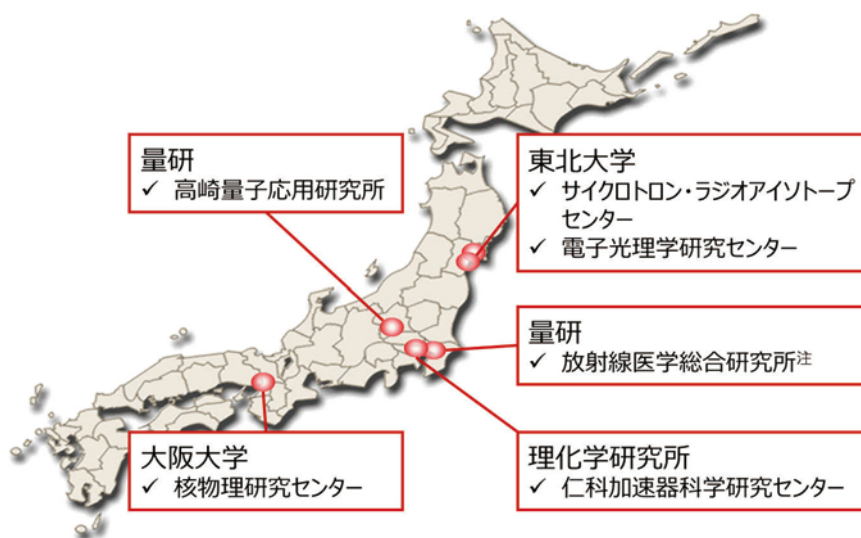
レーザー発振器は、気体や固体の原子の電子エネルギーを変化させて取り出した光を増幅し、ほぼ単一の波長の電磁波であるレーザー光として発振します。指向性が優れている、エネルギー密度が高いなどの理由から、レーザー溶接や歯の治療等に利用されています。

## コラム

## ～国内における短寿命 RI の製造・安定供給に向けた取組～

我が国では、RI 製造のほとんどを海外に依存しています。一方で、半減期の短い RI は、長距離輸送中に RI としての効能を失ってしまいます。そのため、国内においても短寿命核種の製造の取組が進められています。

文部科学省科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）『学術研究支援基盤形成』」リソース支援プログラムにおいて発足した「短寿命 RI 供給プラットフォーム」では、大阪大学核物理研究センターを中核とする6つの機関が RI 供給を行っています。同プラットフォームは、基礎開発・研究用 RI の年間を通じた安定な供給を行うことを目的として、市販品では入手不可能な 100 種類を超える RI の供給を実施しており、その支援対象分野は腫瘍診断学、医学物理学・放射線技術学、生体関連化学、環境動態解析、無機化学、宇宙地球科学等、非常に多岐にわたります。また、RI の安全な取扱いのための技術的な支援を行うため、RI 製造技術講習会も開催しています。



## 短寿命RI供給プラットフォームにおいてRI供給を担う6機関

(注) 量研の組織改編により、2021年4月からは量子医科学研究所。  
(出典) 短寿命 RI 供給プラットフォーム「研究」に基づき作成

また、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST<sup>6</sup>）産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムにおいて、2020年10月に「革新的医療用 RI 製造施設（DATE<sup>7</sup>プロジェクト）整備計画」が立ち上がりました。同プロジェクトは東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター、量研、住友重機械工業株式会社、株式会社千代田テクノルが共同で立ち上げたもので、RI 医薬品として利用できる銅 64 と銅 67 の大量製造と様々ながんの診断治療に有効な RI 医薬品開発のため、多様な RI のオンデマンド製造を目指しています。

<sup>6</sup> Japan Science and Technology Agency

<sup>7</sup> Deuteron Accelerator for Theranostics mEdicine at Tohoku University