

# 試験研究炉とは

中性子が切り拓く産業イノベーション

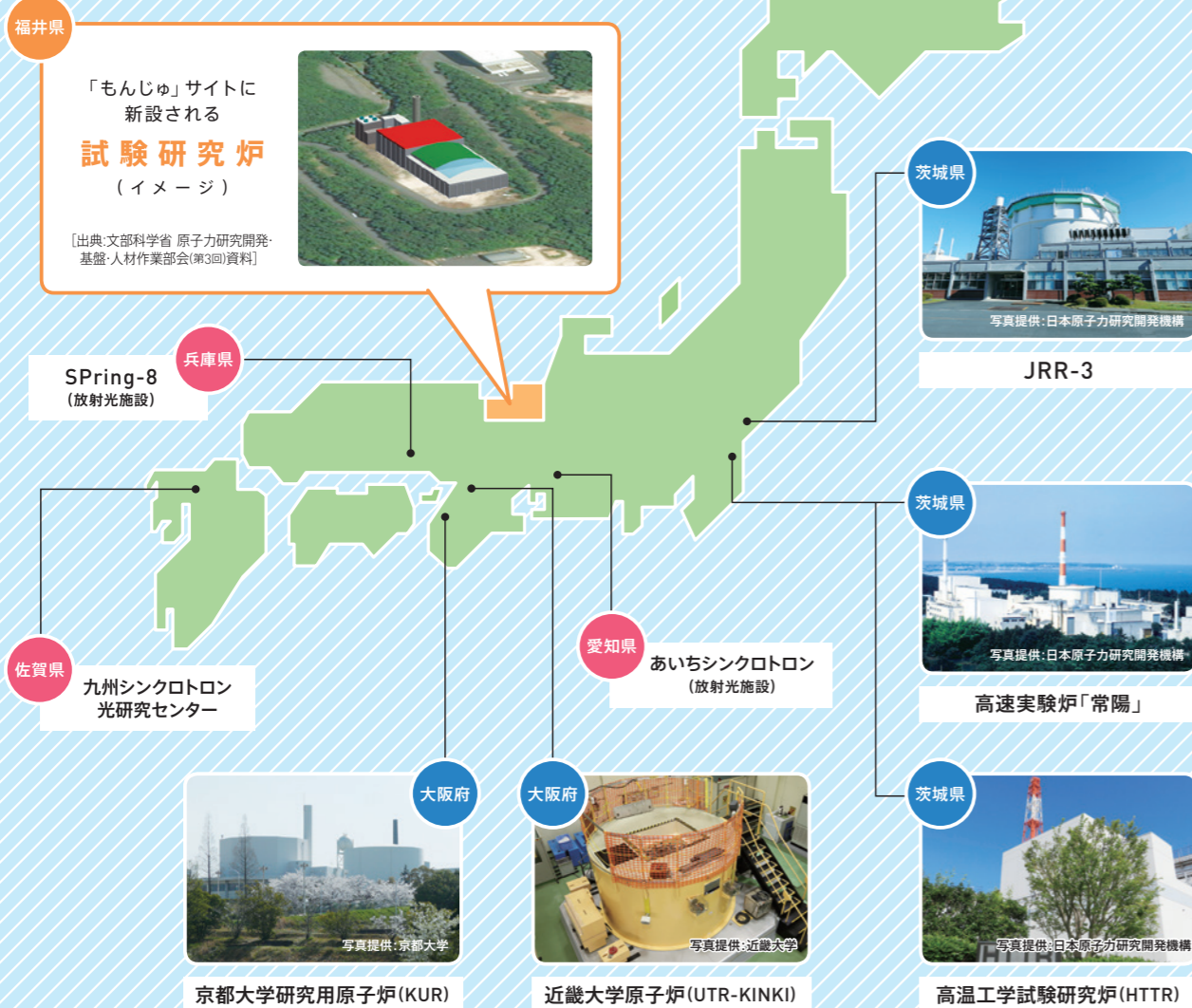
試験研究炉は、放射線の一種である「中性子」を利用して、研究開発を行う実験施設です。私たちの生活に身近な衣類、食品、化粧品、スマホなどの生活用品の素材開発、ガン治療や診断、新薬の開発、電気自動車の先端的な部品や材料開発、高性能半導体の製造、建物や橋梁などの安全性を確認する技術開発など幅広い産業分野で役に立っています。

一方、学術面でも新しい発見や新技術の開発などの基礎的な研究に使われ、ノーベル賞につながるような数多くの成果が出ています。

このように、先進的な実験施設である試験研究炉を、西日本の新たな研究拠点として「もんじゅ」サイト(福井県敦賀市)に建設する計画が進められています。

## 西日本の研究開発を牽引する新たな拠点

新試験研究炉は、JRR-3などの中性子利用施設やSPring-8などの放射光\*施設とのネットワークにより我が国の科学技術の発展に貢献します。



### 主要な試験研究炉と放射光施設

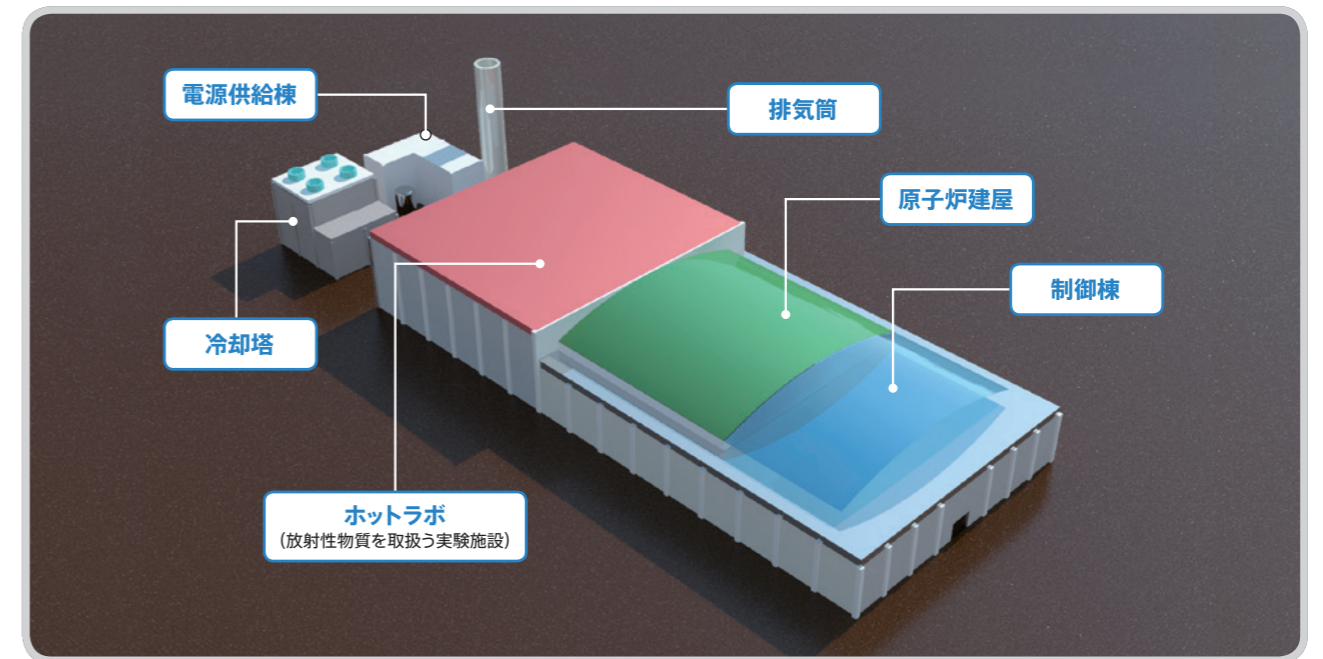
\*放射光とは、光に近い速度で直進する電子の進行方向を磁石などで変えた際に発生する指向性のよい明るい光を言う。

## 「もんじゅ」サイトに設置する新たな試験研究炉の計画概要

令和2年に文部科学省は、「もんじゅ」サイトに設置する試験研究炉として、中性子ビーム利用を主な目的とする「中出力炉(熱出力10MW程度)」に決定しました。試験研究炉の建設・運転を通して、研究開発・人材育成の中核的拠点を形成し、地元振興を図ります。令和4年度中に詳細設計を開始し、早期の建設・運転を目指します。



[出典:文部科学省 原子力科学技術委員会(第26回)資料に基づき作成]



### 新試験研究炉のイメージ図

[出典:文部科学省 原子力研究開発・基盤・人材作業部会(第3回)資料に基づき作成]

### コ ン テ ン ツ

西日本の研究開発を牽引する新たな拠点

「もんじゅ」サイトに設置する新たな試験研究炉の計画概要

#### 中性子の素顔

試験研究炉と発電用原子炉の違い

~中性子の大きさ

放射線の種類 ~中性子の6つの能力

ノーベル賞と中性子散乱

多くの産業分野で

利用される試験研究炉

#### 研究開発

- P1 中性子ラジオグラフィの利用 P7
- P2 中性子散乱の利用 P9
- 放射化分析の利用 P11
- 放射性同位元素(RI)の製造と利用 P12

#### 産業分野での利用例

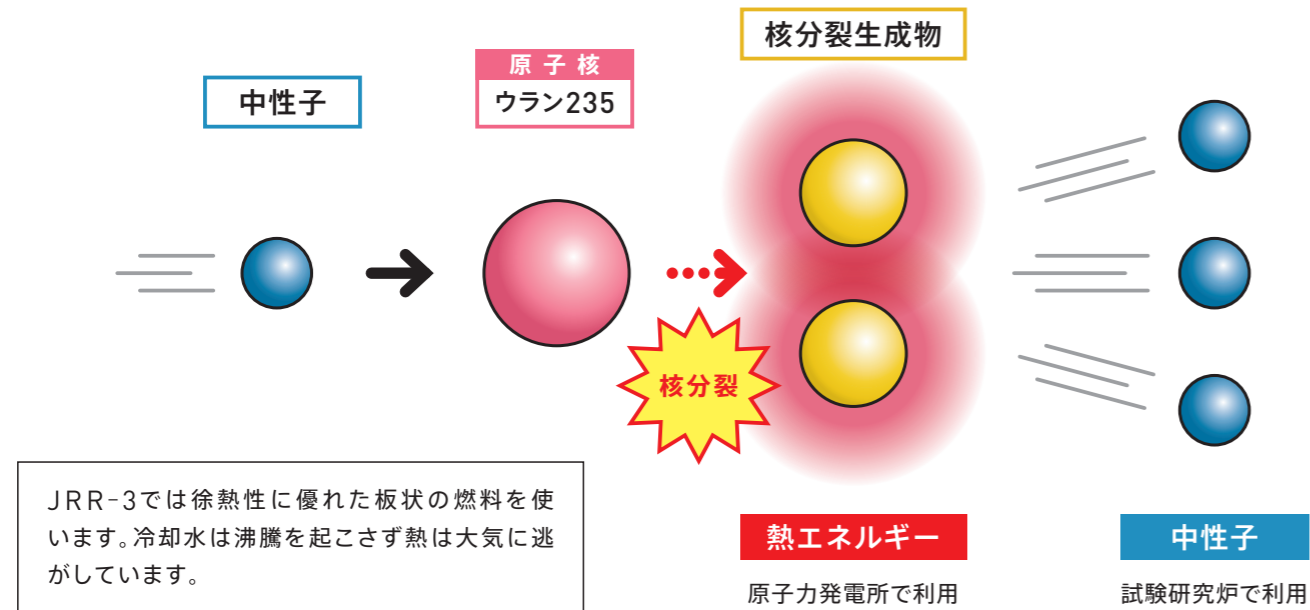
- P3 医療/化学分野 P13
- 基盤産業/社会インフラ分野 P15
- P4 輸送機械分野 [自動車/航空/宇宙] P17



表紙の写真は、電気を帯びた電子や陽子(荷電粒子)が水中の光の速さより早い速度で進む時に発生する青白い光(チェレンコフ光)で、原子炉を運転した時などに見られる現象です。 [写真提供:京都大学]

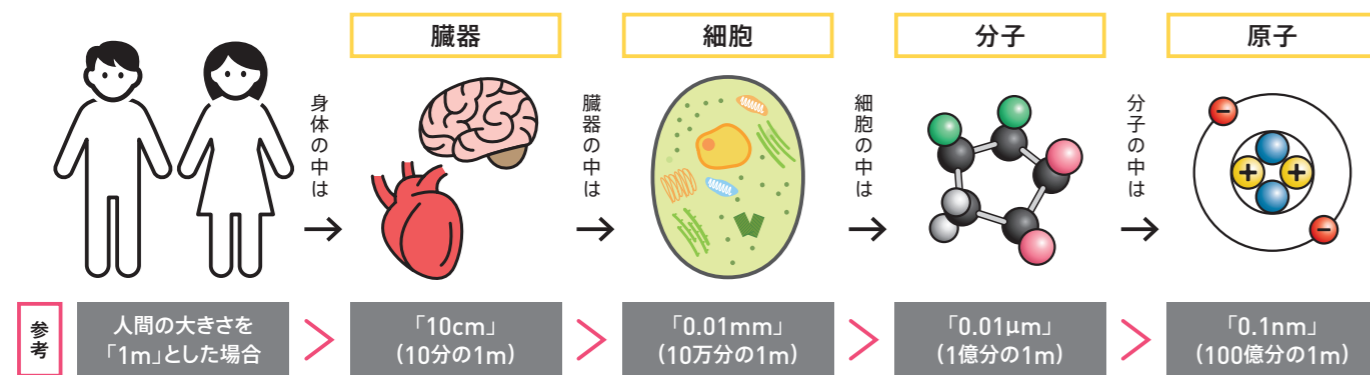
## 試験研究炉と発電用原子炉の違い

ウランなどの原子核に中性子を当てると、核分裂反応により中性子と熱エネルギーが発生します。試験研究炉では、中性子を利用して基礎から応用までの広い分野にわたって実験・研究等を行うことができます。一方、発生した熱エネルギーを電気に変えるのが発電用原子炉です。



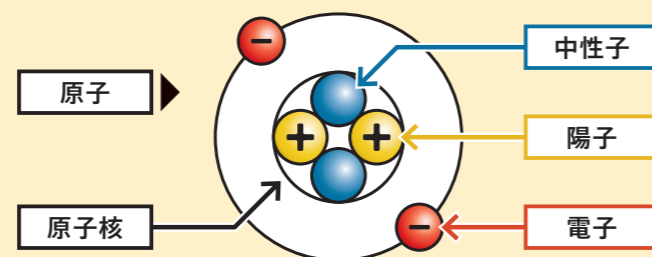
## 中性子の大きさ

地球にある全ての物質は原子の集まりから出来ています。人間の身体を例にとると、身体は臓器から作られ、更に細胞、分子、原子に細分化されます。



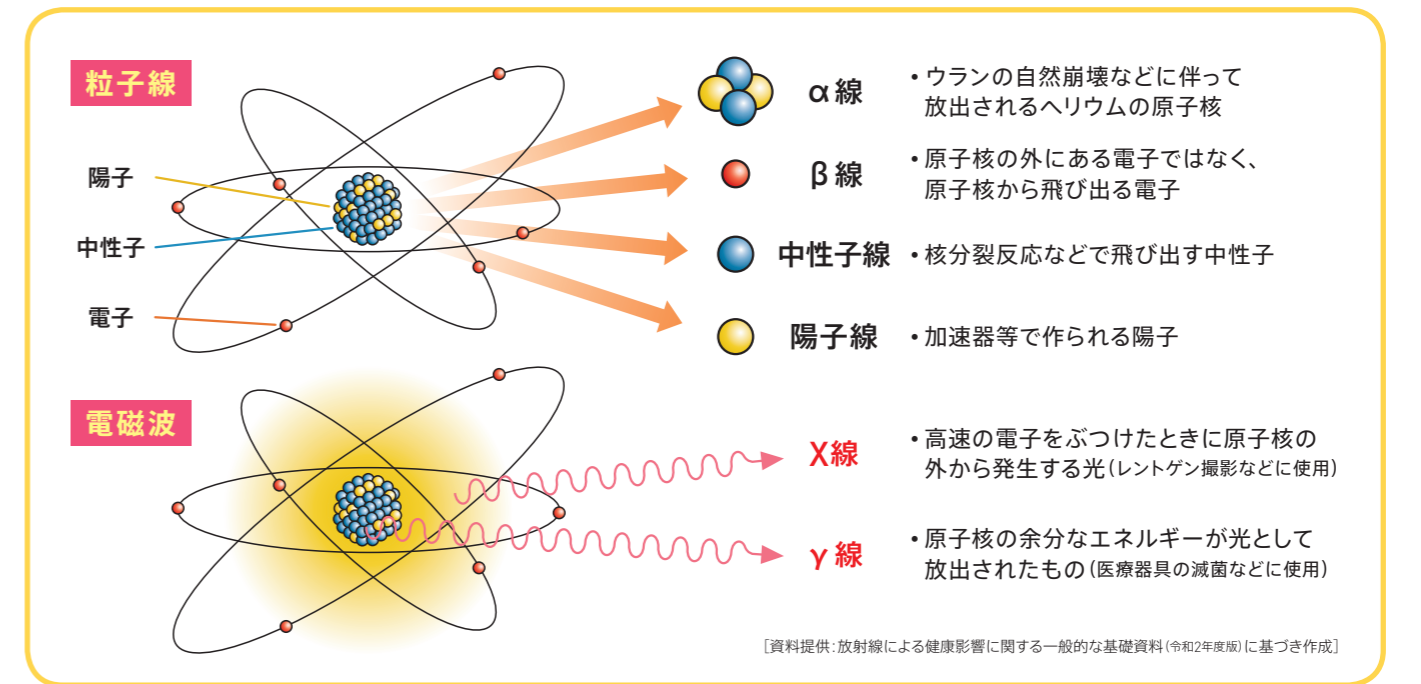
### [ 原子の構造 ]

原子は原子核と電子で構成され、更に原子核は陽子と中性子で構成されます。その中性子は原子の10万分の1程度の大きさです。



## 放射線の種類

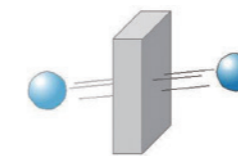
放射線には色々な種類がありますが、目で見えることはできません。粒子としての「粒子線」と波としての「電磁波」の2つの性質に分けられます。



## 中性子の6つの能力

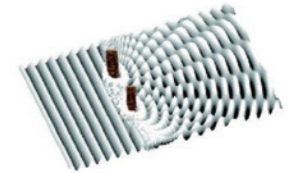
### 01 物を通り抜ける能力

中性子は電気を持たず、物質を構成する電子の影響を受けずに物質を透過することができるため、物を壊すことなく中の様子を見ることができます。



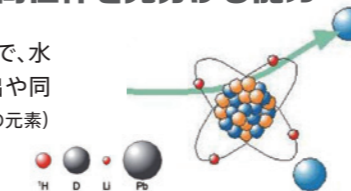
### 04 原子の並び方を見る能力

光などと同じ波の性質を持つので、原子により散乱されて波紋を作ります。この波紋を観察することで原子の配列が分かります。



### 02 軽い元素や同位体を見分ける能力

原子核と相互作用するので、水素などの軽い元素の検出や同位体(中性子数の異なる同一の元素)の区別ができます。



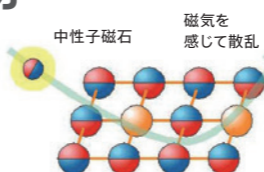
### 05 物質中の原子の動きを見る能力

原子の運動エネルギーと同程度のエネルギーを持つ中性子を使用するので、原子の動きを見ることができます。



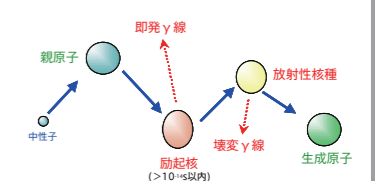
### 03 磁気を感じる能力

磁石の性質を持つ中性子を、磁気を持つ物質を通過させると方向が変わる現象(回折現象)を利用して、原子や分子の並び方を調べることができます。



### 06 原子核と反応したり、変換する能力

原子核と反応して、即発γ線を放射したり、原子核を他の原子核に変換する能力を持っています。



# ノーベル賞と中性子散乱

## 中性子の特有な性質と研究開発

中性子は電気を帯びていませんが磁石の性質は持っています。また、その重さは陽子と同じ程度で電子の1800倍あります。中性子科学として、この中性子の性質を生かした応用についての研究が精力的に行われ、他の放射線(X線や陽子線)で不可能であった研究開発の新しい技術分野が切り拓かれてきました。(P4:「中性子の6つの能力」参照)

## 中性子の応用研究にノーベル賞



クリフォード G シュル



バートラム N ブロックハウス

中性子が物質中を通り抜ける際の振る舞いを観測することで、その物質の固有で詳細な性質を知る研究に大きな貢献をしたことから、アメリカとカナダの物理学者が1994年にノーベル物理学賞を受賞しました。

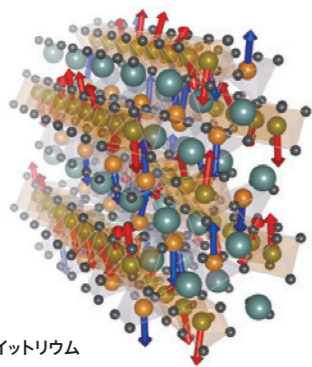
2人の物理学者は、それぞれの国の大学や研究所の試験研究炉を使って研究を進め、中性子が物質中を通り抜ける際に受ける影響を観察することができる方法を提案しました。

[出典:日本中性子科学会「N氏の新たな冒険」より転載]

## 中性子散乱法を中心にした試験研究炉の利用拡大

### 磁石

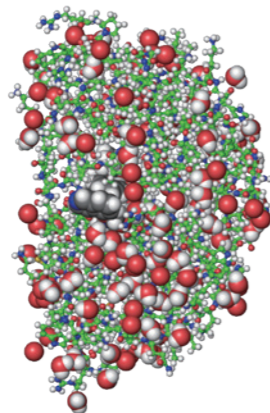
マルチフェロイック磁性体  $YMn_2O_5$



● イットリウム  
● マンガン  
● 酸素

### タンパク質

HIVタンパク質の構造



● 水素  
● 炭素  
● 窒素  
● 酸素  
● 硫黄

中性子を使った散乱法は、鉄のような硬い物質から食品や化粧品のように柔らかい物質まで幅広いものの性質を観察できます。物質の性質を理解することで、製品の品質の向上や価格の安定化に寄与しています。(この散乱法の適用例として、鉄を主成分としている磁石と、化粧品などの構成物質であるタンパク質構造の画像を示します。)

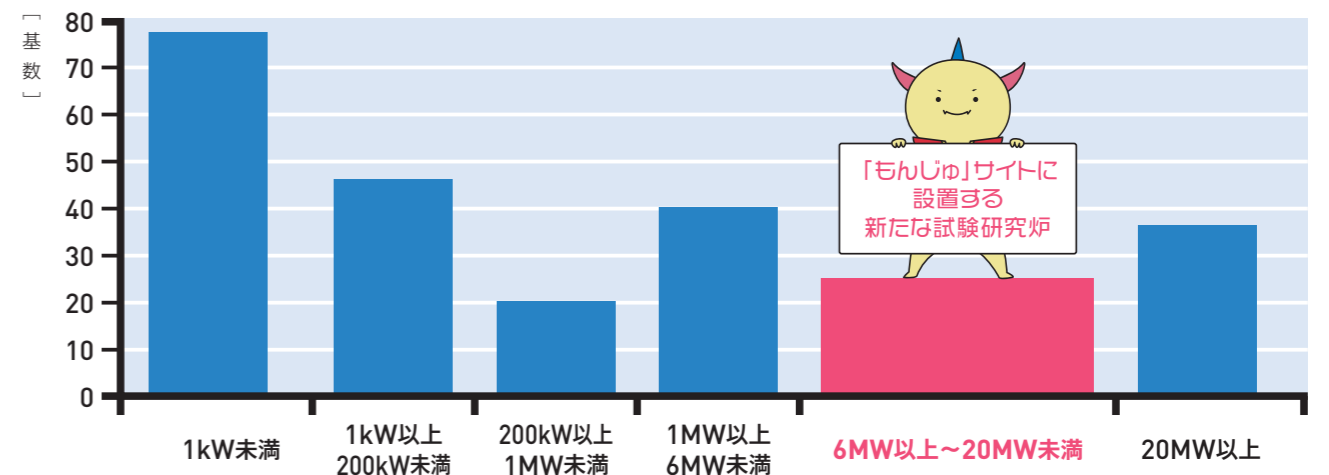
[資料提供:日本原子力研究開発機構]

# 多くの産業分野で利用される試験研究炉



## 世界の試験研究炉の出力別基数分布

世界の試験研究炉で運転中のものは約220基、計画・建設中のものは27基あります。(2022年2月時点)



# 中性子ラジオグラフィの利用

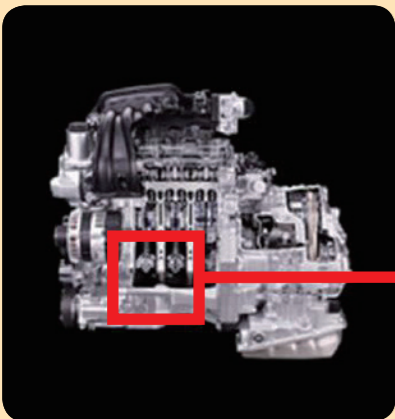
中性子ラジオグラフィとは、中性子線の持つ「物を通り抜ける性質」を利用して物質の透過画像を撮影する技術です。一般的に知られているX線とは透過性が異なるため、両者は撮影技術として補完的に用いられています。中性子線は水素や炭素など軽い元素を含んだ物質の撮影に適しており、水などの沸騰現象、植物内の水分移動、燃料電池内の水分の挙動、自動車・航空機などの燃料の挙動などが可視化できます。

## ガソリンエンジン室内の動きを可視化

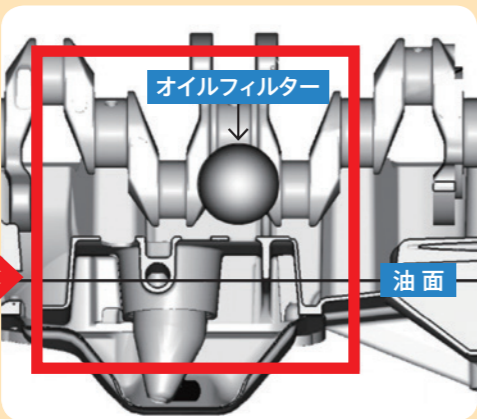
中性子はアルミ合金中で透過性が高く、水やオイルなどでは透過性が低いために、コントラストが付きやすく、オイルの動きを動的に観察することができます。

自動車エンジン室の中性子透過

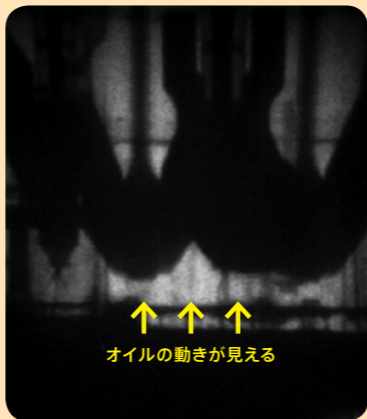
可視化領域



拡大図



中性子

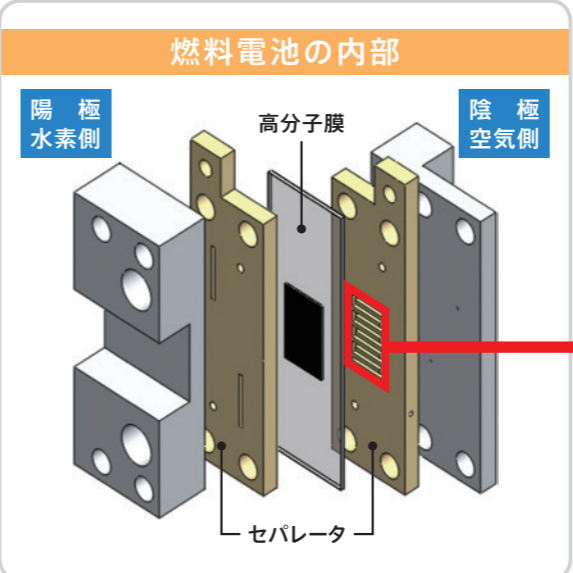


[資料提供: 日本原子力研究開発機構]

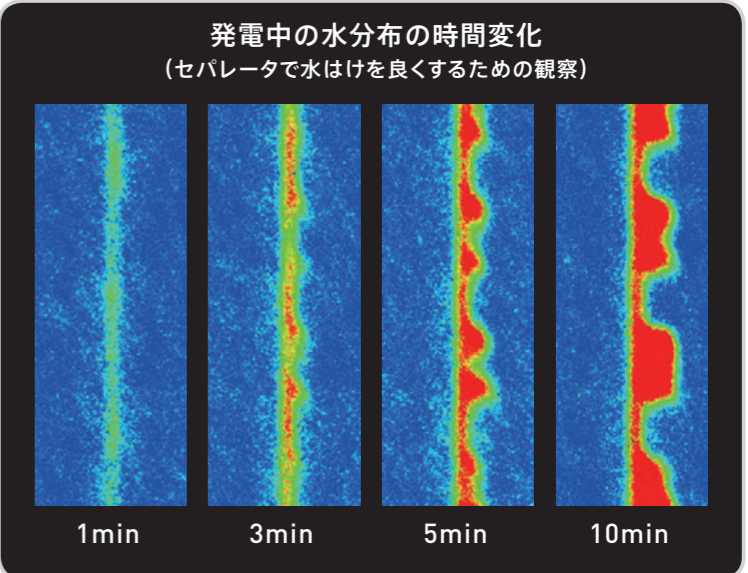
## 燃料電池の反応過程の可視化

水素を使って発電する燃料電池の内部で、水素燃料と空気中の酸素が反応し、水(赤く見える部分)が生成される過程を観察できます。

燃料電池の内部



発電中の水分分布の時間変化  
(セパレータで水はけを良くするための観察)




[資料提供: 神戸大学 村川英樹・杉本勝美・浅野等]


## 中性子透過画像

おもちゃの透過画像


実像



中性子



X線



中性子透過画像はX線透過画像と比較して内部のプラスチックのカバーや容器を観ることができます。 [資料提供: 日本原子力研究開発機構]

ガラスの透過画像

実像



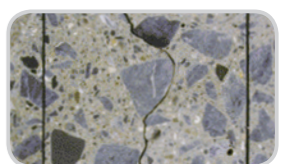
中性子



中性子透過画像により水の動きを観ることができます。 [資料提供: 日本原子力研究開発機構]

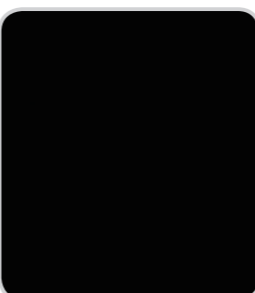
## コンクリートのひび割れに浸入する水の様子

コンクリートの割れ目に上から水がしみ込んでいく様子を中性子で可視化し、約15分から120分後までの間に水がしみ込む様子を観察することができます。

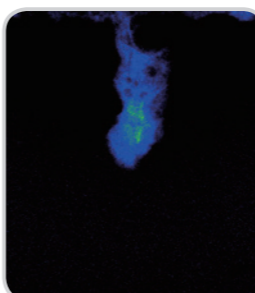


水分移動(水を疑似カラー化)

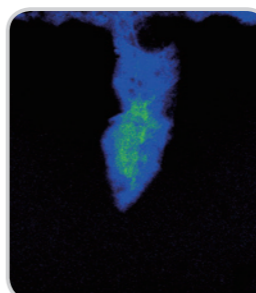
0min



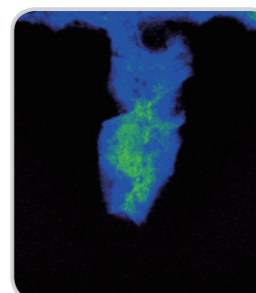
15min



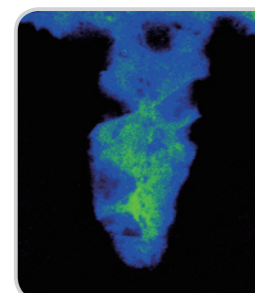
30min



60min



120min

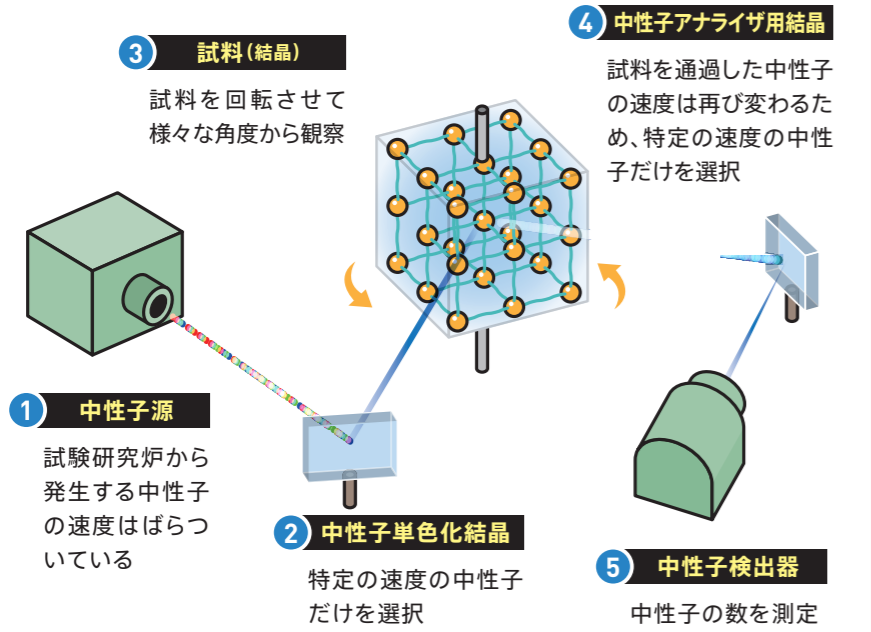


[資料提供: 日本原子力研究開発機構]

# 中性子散乱の利用

中性子散乱とは、中性子ビームを物質に当てると物質の原子や分子によって中性子エネルギーの大きさや進行方向が変化する現象のことです。散乱した中性子の強度から、物質や生体の構造(原子間の距離等)や機能を明らかにします。中性子の透過力による金属材料や磁性材料などのナノ構造解析、高分子の構造、特性解析などに利用されています。

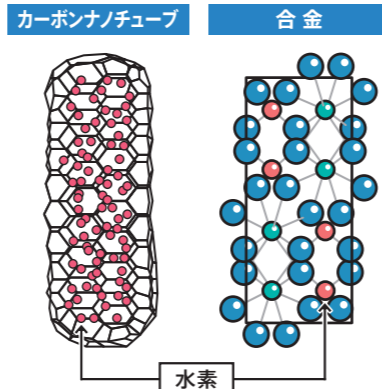
## 散乱(三軸分光)の測定原理



## 水素吸蔵合金の開発

水素ステーションなどで使われている、水素を大量にためることができる水素吸蔵合金などの開発に中性子散乱が活用されています。水素拡散過程の構造を中性子を使って解析できます。

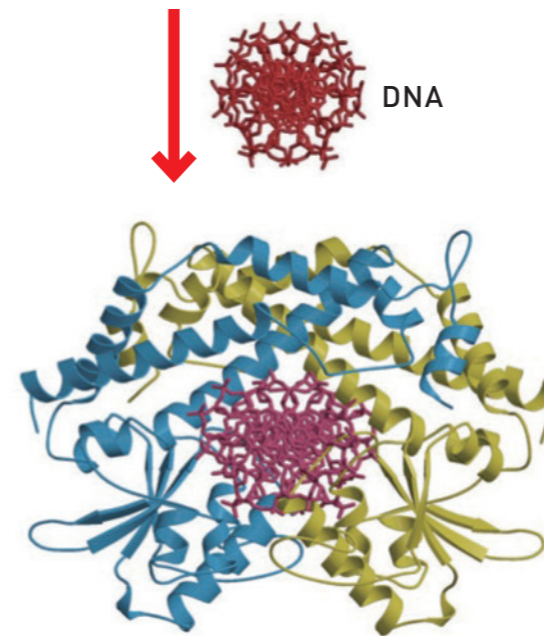
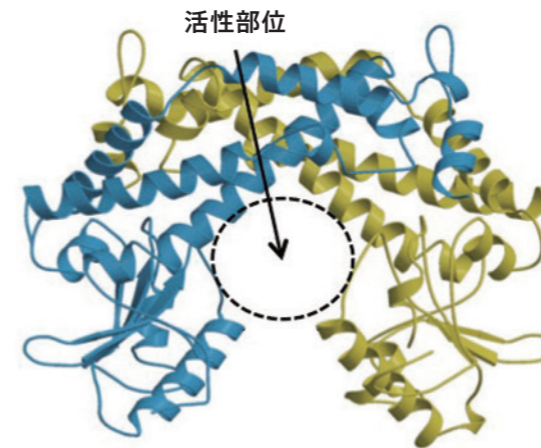
### 水素吸蔵材料の開発



## タンパク質の挙動研究

遺伝子操作の研究で使われている中性子散乱によるタンパク質を構成している分子の動きを可視化した例です。上段に示す注目酵素の構造体の活性化された空間に、DNAが取り込まれ(下段の図)その結果DNA分子の構造を変えることが出来るプロセスの例です。

### 注目酵素



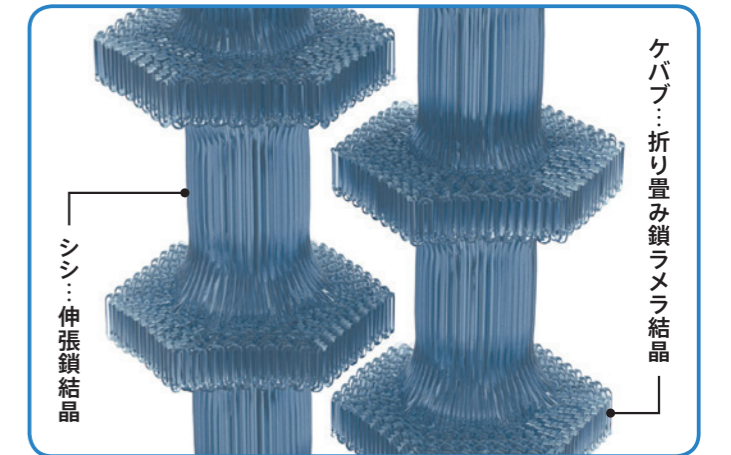
### DNAを取り込んだ酵素

[出典: 日本中性子科学会「N氏の新たな冒険」より転載]

## 超高強度高分子材料(ポリエチレン繊維)の開発

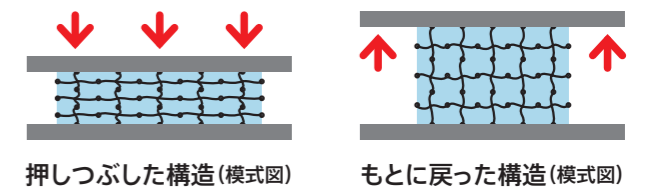
ポリエチレンの高強度化につながる特殊構造(シシケバブ構造)が生成される仕組みを、中性子散乱により解析できます。

### シシケバブ構造の強い繊維

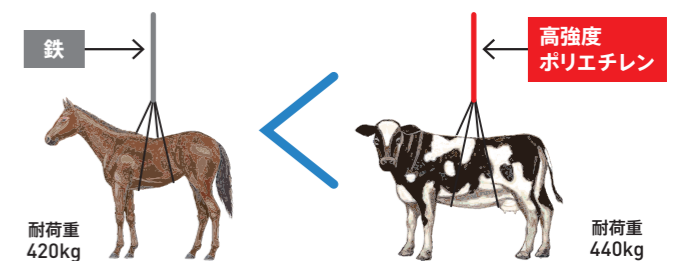


強さの要因は、長さの異なる高分子が串焼き(トルコ料理のシシケバブ)の様な構造に起因していることを中性子を使って解明しています。

### ゲルの構造を解明



### ポリエチレンをまとめて糸にし、鉄より強くする

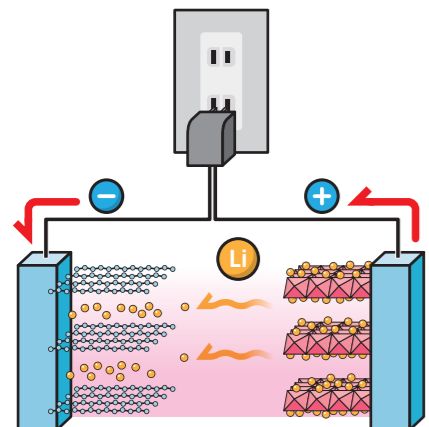


[出典: 日本中性子科学会「N氏の新たな冒険」より転載]

## リチウムイオン電池の動作の把握

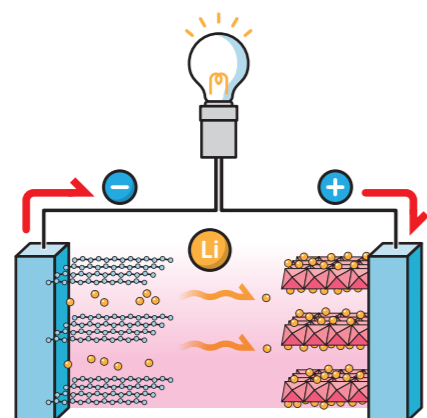
### 充電反応

充電反応では、正極に高いプラスの電圧を与えると、リチウムイオンは正極から抜け出して負極へ移動し、エネルギーが蓄えられます。



### 放電反応

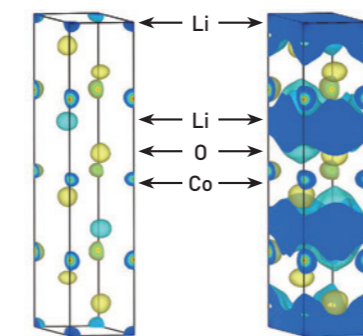
放電反応では、逆向き反応が自発的に起こり、リチウムイオンが負極から正極に流れます。



[出典: 日本中性子科学会「N氏の新たな冒険」より転載]

リチウムイオン電池の電極の構造(原子レベル)を中性子散乱の技術で解析することで、電池を動作させたときの特性を把握できます。

### リチウムイオン電池原子レベル構造



LiCoO<sub>2</sub>電池正極のリチウム密度の変化とLiの拡散経路

[資料提供: 日本原子力研究開発機構]

# 研究開発 3

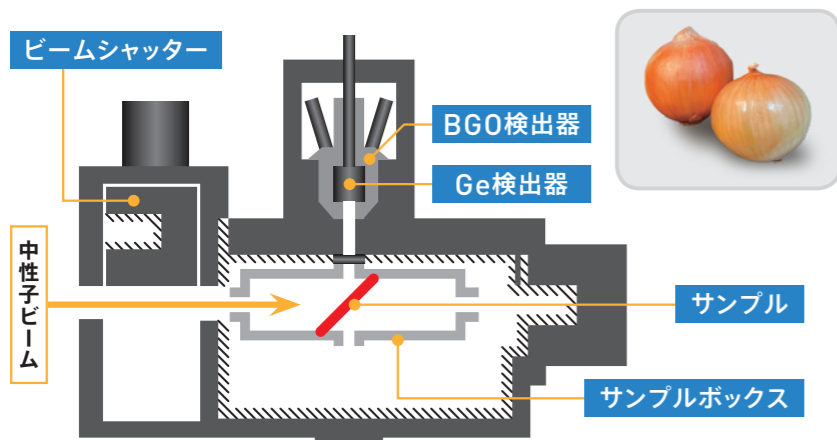
## 放射化分析の利用

放射化分析とは、試料に中性子を照射し、放射化された元素から放出される放射線を測定することにより、試料に含まれる元素を分析する手法です。検出感度が高く、少量の試料でも多元素の同時分析が可能です。物質中の透過能力が高いため、表面分析にとどまらず、試料全体を分析できることが特徴で、自然科学、工学の分野だけでなく、考古学、医学、環境の分野でも元素分析法として利用されています。

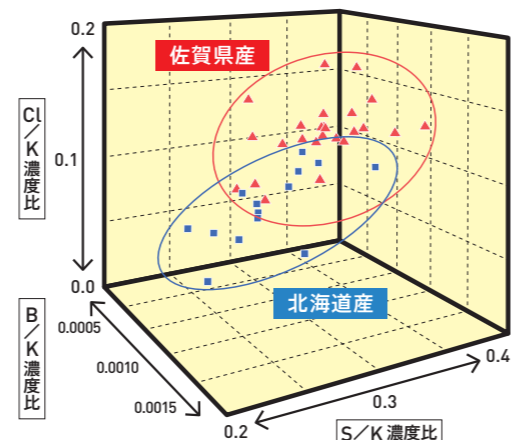
### たまねぎの産地を調べる!

たまねぎのカリウム(K)濃度に対するホウ素(B)、イオウ(S)、塩素(Cl)の濃度比の分布は、佐賀県産と北海道産とで異なっているため、放射化分析により産地を同定できます。

#### 即発ガンマ線法分析装置



#### たまねぎ試料の元素濃度比分布



[資料提供: 日本原子力研究開発機構]

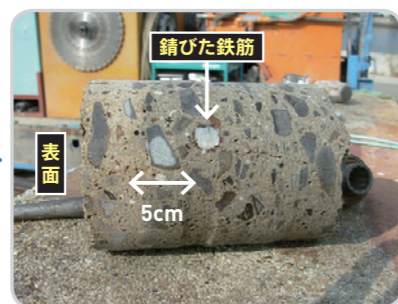
### コンクリート中への塩水浸透測定

防波堤(海岸壁)のコンクリート壁からコア試料を取り、放射化分析によってカルシウム(Ca)と塩素(Cl)のガンマ線の強度を測定することで、コンクリート中の塩水の浸透度合いを評価できます。

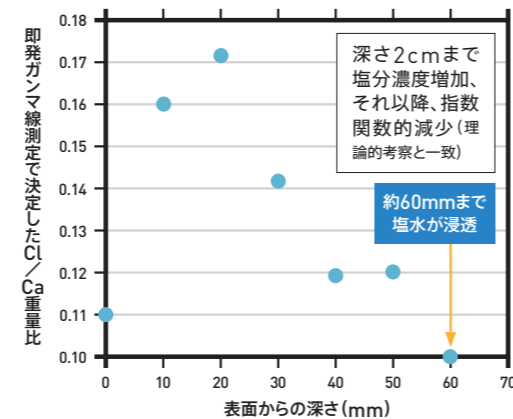
#### 海岸のコンクリート中の塩分濃度分布



20~30年程度、海風にさらされていたコンクリート



コア抜きしたコンクリート表面から1cm間隔で試料を採取



[資料提供: 日本原子力研究開発機構]

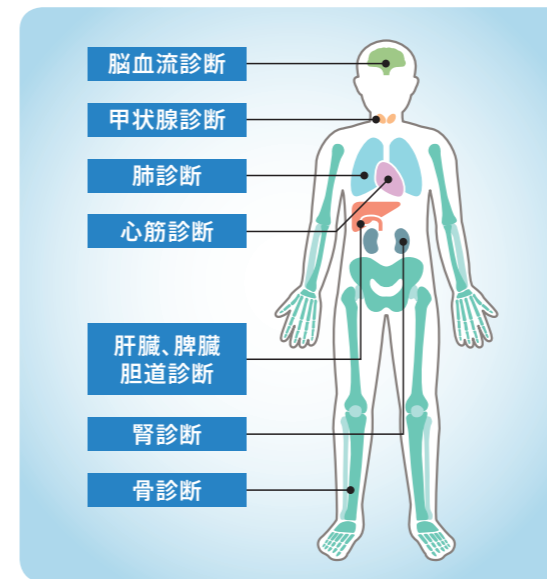
# 研究開発 4

## 放射性同位元素(RI)の製造と利用

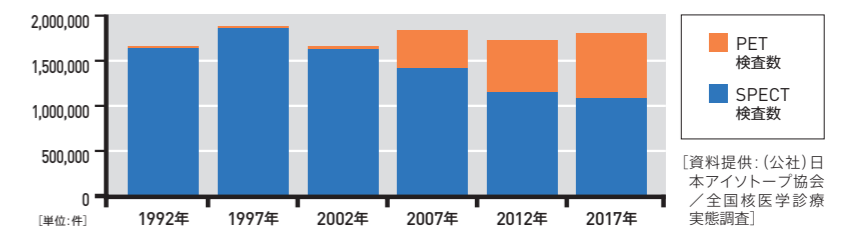
放射性同位元素(RI)は、その多くが試験研究炉の中性子や加速器からの陽子線等を照射することにより製造されます。工業分野では非破壊検査、計測装置・分析装置、医療用具の滅菌や殺菌に、医療分野では悪性腫瘍の治療や診断に利用されています。

### 医療用RIの利用

国内の医療用RIは核医学診断や治療に利用されています。核医学診断では国内で年間100万件以上行われ、様々な病気の発見に寄与しています。最近では治療薬も増えており、年々治療件数が増加しています。

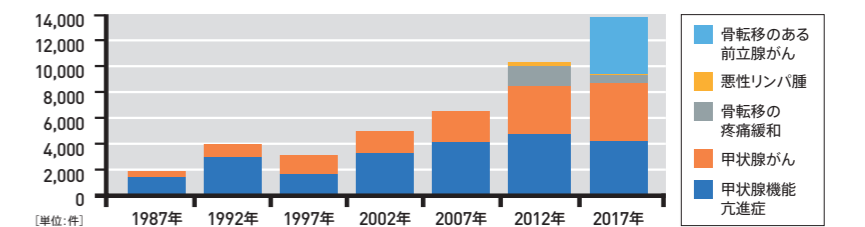


#### 核医学診断の実績



[資料提供: (公社)日本アイソトープ協会/全国核医学診療実態調査]

#### 核医学治療の実績

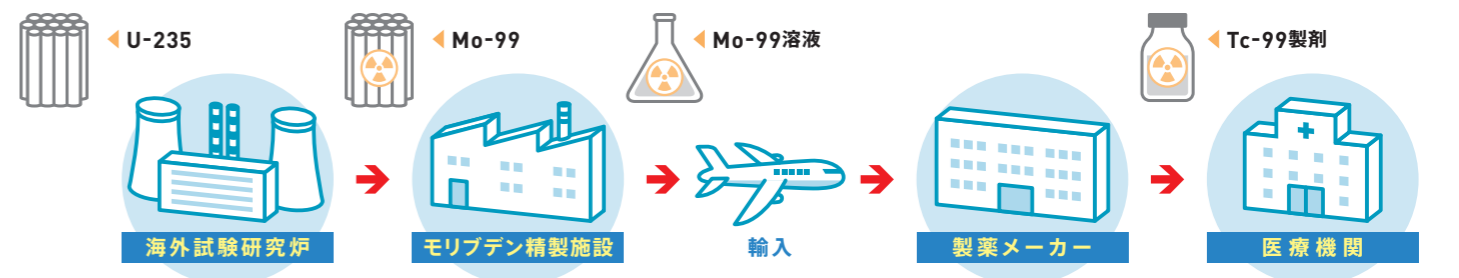


[資料提供: (公社)日本アイソトープ協会/全国核医学診療実態調査]

### 核医学診断の現状

核医学診断には、PET用の薬剤等の国内(加速器)で製造される短半減期のRIと、海外の試験研究炉で製造され日本に輸入されているRIが使われます。特にSPECT検査に用いるテクネチウム(<sup>99m</sup>Tc)の原料となるモリブデン(<sup>99</sup>Mo)は、100%を海外から輸入しています。モリブデンの国産化を目指し、試験研究炉や加速器を用いた製造技術の研究開発が進められています。

#### 現在のテクネチウム製品供給の流れ



#### コラム

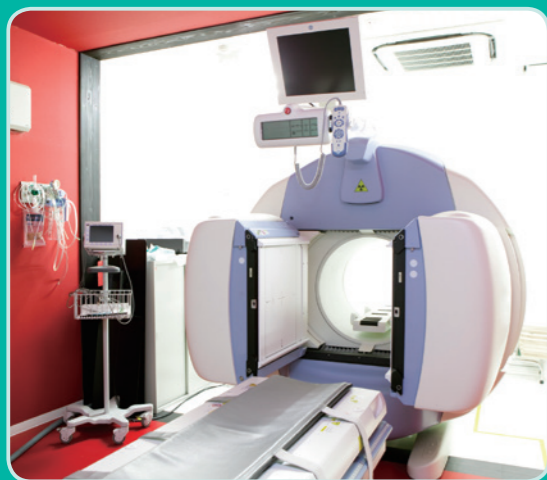
放射性同位元素(RI)は、同じ元素で中性子の数が異なり放射線を発するもので天然に存在するものと、試験研究炉等で人工的に製作するものがあります。人工のRIは、放射線治療・診断や工業分野で利用され、国民生活の向上に大きく貢献しています。

# 医療／化学分野

近年の医療分野での放射線利用は目覚ましく、がんの診断・治療などに放射性同位元素(ラジオアイソトープ:RI)が幅広く使われており、海外の試験研究炉では約40種類ものRIが作られています。医療／化学分野では中性子を使って物質の基本的な構造を解析し、薬剤開発や衣類に使われる繊維素材、肌にやさしい化粧品、安全な食品などの開発に利用されています。

## 医療・製薬

RI利用／散乱



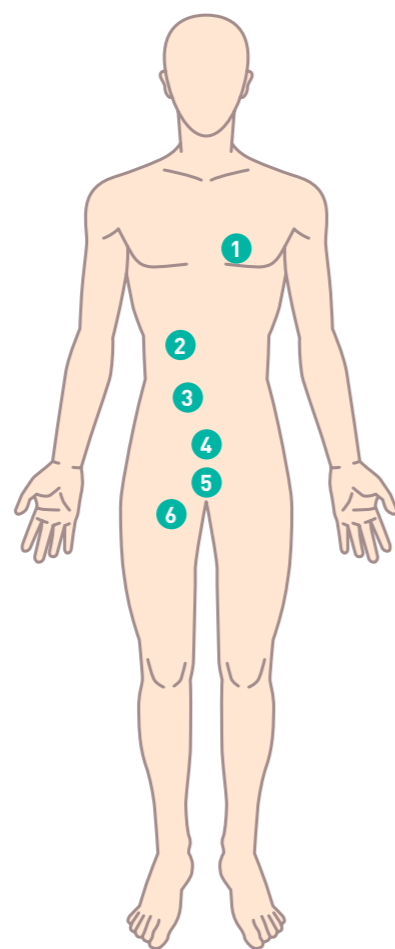
RIを体内に投与して画像化する断層撮影検査です。



試験研究炉では多種類の放射性同位元素の製造が可能です。先進国では診断・治療に50人に1人の割合で使われており、現代の医学においてなくてはならない薬品の1つとなっています。



### 試験研究炉で製造される医療用RIの利用先



医療用RIは、悪性腫瘍の診断や放射線治療に利用されています。

- ① Tc-99m (テクネチウム)  
心臓疾患の診断  
がん診断
- ② Ho-166 (ホルミウム)  
肝臓がん治療\*
- ③ Lu-177 (ルテチウム)  
神経・内分泌系  
腫瘍治療
- ④ I-125/I-131 (ヨウ素)  
前立腺がん  
甲状腺がん治療
- ⑤ Ir-192 (イリジウム)  
頸部がん、前立腺がん  
乳がん、皮膚がん治療
- ⑥ Y-90 (イットリウム)  
悪性リンパ腫  
肝臓がん治療\*

\*国内では未承認

## 繊維・化学

放射化分析／散乱



ポリエステルやポリウレタンなどの高分子繊維の構造解析により、特色のある製品開発が可能です。



## 化粧品など

放射化分析／散乱／ラジオグラフィ



人間の皮膚やシャンプーのような柔らかい物質やコーティングなどの多層構造を解析することができます。また、毛髪内部の水分状態を可視化することや、化粧品に含まれる金属元素含有量を分析することもできます。



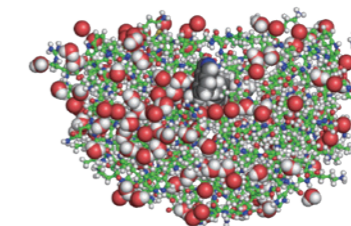
### コラム

核医学診断では、特定の臓器や組織に集まりやすい性質を持った放射性同位元素が使用されます。診断方法には、放射性同位元素から放出される陽電子(放射線の仲間)を使った画像による方法(PET)や放出されるγ線を使った3次元画像による方法(SPECT)があります。

### [タンパク質の構造解析]

X線だけでなく中性子を使うと、水素の構造や結合状態などより詳しい構造が分かります。

→酵素の機能解明や創薬開発につながる



- 水素
- 炭素
- 窒素
- 酸素
- 硫黄

[資料提供:日本原子力研究開発機構]



# 基盤産業／社会インフラ分野

試験研究炉の中性子は、我が国の基盤産業である電気、自動車、鉄鋼、建設など多様な分野で利用されています。例えば、電気自動車などの次世代電池の開発、大電流の制御等に利用されるシリコン半導体の製造、建築物や架橋などの社会インフラの基盤である構造物の健全性評価などに使われています。

## 次世代電池の開発

ラジオグラフィ／散乱



スマートフォン



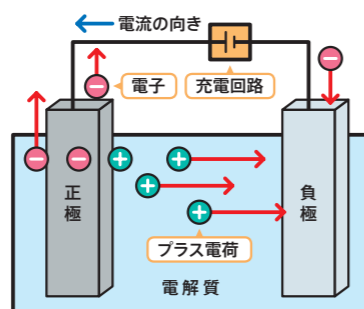
電気自動車



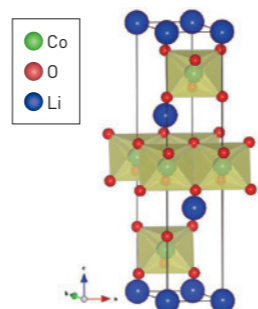
水素エネルギーで走る燃料電池バス [資料提供: 敦賀市]

### リチウムイオン電池、燃料電池

繰り返し充放電ができるリチウムイオン電池。充電・放電によるリチウムイオンの移動の様子が中性子により確認できます。



電池内部のイオンの動き

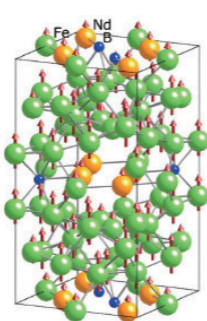
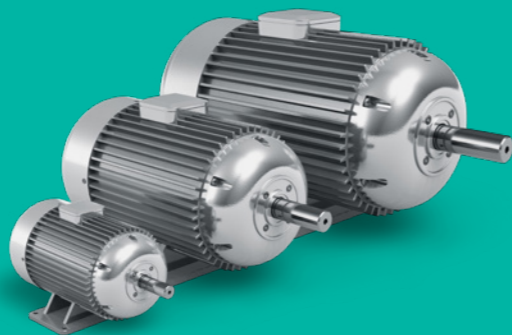


リチウム電池の結晶構造  
[資料提供: 日本原子力研究開発機構]

## モータの開発

ラジオグラフィ／散乱

ハードディスク、電気自動車などのモータや発電機に使われている磁石の結晶構造、磁力の分布などが散乱技術で観察できます。



ネオジウム磁石の結晶構造  
[出典: 日本中性子科学会  
「N氏の新たな冒険」より転載]

### コラム

シリコン合金をパワー半導体にして使うために、中性子によってシリコン元素の一部をリン元素に変える技術をシリコンドーピングと呼んでいます。高い品質の半導体で大電流を制御するために利用されます。

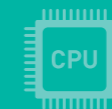
## パワー半導体の製造

シリコンドーピング

インゴット(シリコン合金)



ウェハー



エアコンのインバーターなどに使われるパワー半導体



電車速度の制御や送電の安定化に利用しています

## コンクリート・構築物の評価

ラジオグラフィ／散乱

鉄道、橋梁、ダムなどの構造物の内部を観察することにより、健全性や寿命を評価することができます。



鉄道



橋梁



ダム

# 輸送機械分野 [自動車/航空/宇宙]

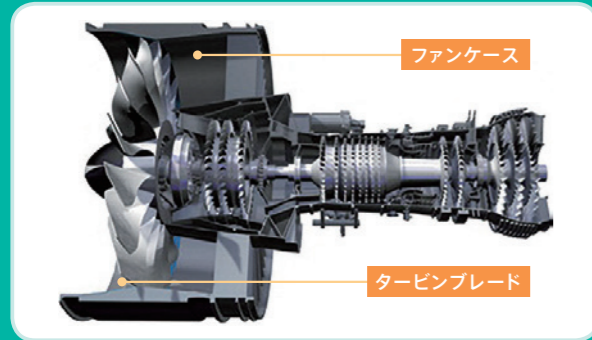
ロケットや空飛ぶ自動車などの材料に必要となる軽くて強靱な材料の開発や、主要部品の性能向上に向けた非破壊検査等に利用されています。

## 飛行機のエンジン開発

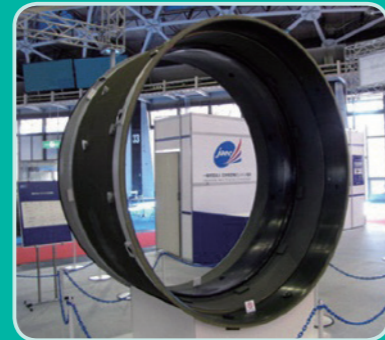
ラジオグラフィ / 散乱



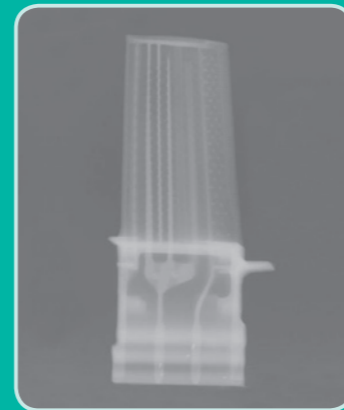
飛行機の両翼のジェットエンジンのタービンブレードを可視化して検査することができます。



航空機エンジン断面図  
[資料提供: P&W社]



ファンケース  
[資料提供: 日本航空機エンジン協会]



タービンブレードの透視画像  
[資料提供: (公社)日本アイソープ協会]

## 宇宙産業

ラジオグラフィ / 散乱



宇宙ロケットの部品である、耐熱性の高い軽量化された材料の開発で内部構造等の観察に中性子が使われています。



空飛ぶ自動車



宇宙アンテナ



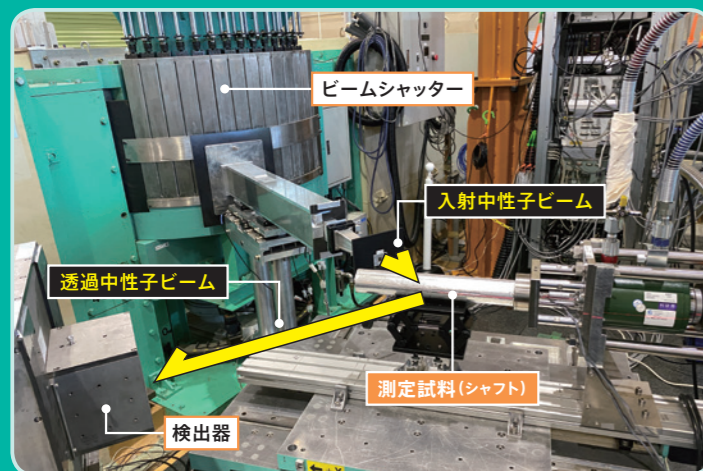
宇宙ロケット

## 部品、機器、材料評価

ラジオグラフィ / 散乱



機器、配管、構造物等の材料特性(残留応力)検査に利用されています。



シャフトの加工ひずみ測定  
[資料提供: 日本原子力研究開発機構]



配管溶接部のひずみ測定  
[資料提供: 日本原子力研究開発機構]

## 自動車の開発

ラジオグラフィ / 散乱



自動車業界では、車体、エンジン、タイヤなど主要構成部品の性能向上のための開発に、中性子による組成分析・観察、動作の可視化などが利用されています。



エンジン内部の潤滑油の動きを評価するために中性子ビームにより高速で可視化しています。  
[資料提供: 日本原子力研究開発機構]



低燃費タイヤを実現するため、タイヤの転がり抵抗の低減化を散乱技術により解析します。

### コラム

中性子の優れた透過能力を利用した残留応力解析は、物質内部のミクロな結晶構造を観察(原子と原子間の距離を測定)し、材料深部のひずみ分布を非破壊で測定できる方法です。溶接部、自動車部品、コンクリート構造内部の鉄筋の重要な評価技術の一つとなっています。

発行年月 令和4年3月

編集・発行 福井県 地域戦略部 電源地域振興課 嶺南Eコースト計画室  
／公益財団法人 原子力安全研究協会

制作に当たっては、日本原子力研究開発機構の専門家の協力を得ています。

福井県マスコットキャラクター  
「はびりゅう」



地味にすごい、福井  
"JIMI NI SUGOI" FUKUI