

# JRR-3における中性子利用の現状

原子力研究開発・基盤・人材作業部会  
令和6年2月9日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
原子力科学研究部門 原子力科学研究所  
物質科学研究センター

上級研究専門官（物質科学研究担当） 武田全康



# 本日の内容

1. JRR-3について
2. JRR-3（中性子）で何ができるのか？
3. 中性子照射利用例
4. 中性子ビーム利用例
5. 利用実績
6. JRR-3が現状で抱える課題
7. JRR-3への期待

**JRR-3について**

# 東海村にある中性子実験施設

原子力科学研究所

JR常磐線東海駅

茨城県那珂郡東海村

JRR-3 : 定常中性子



J-PARC 物質・生命科学実験施設 :  
パルス中性子 (KEKと共同運営)

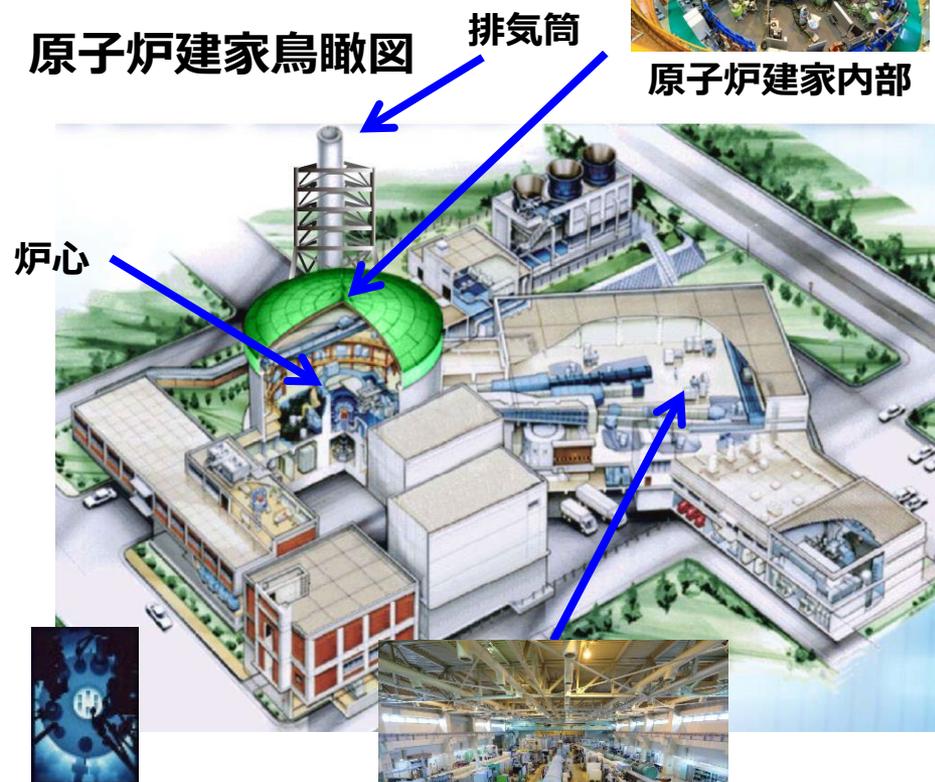
- 昭和37年に臨界【わが国初の国産研究炉】 → 原子力の黎明期を支える多くの研究に活用
- 平成2年に改造後初臨界【性能向上目指した出力20MWの高性能汎用研究炉】  
→ 目的：照射利用（ラジオアイソトープ製造，放射化分析）  
中性子ビーム利用（物質の構造解析，即発γ線分析など）



原子炉建家内部

| JRR-3の主な仕様 |  |
|------------|--|
| 目的         | ビーム実験，燃料材料照射，RI生産，放射化分析等                 |
| 型式         | 濃縮ウラン軽水減速冷却プール型                          |
| 燃料要素       | 低濃縮ウランシリコンアルミニウム分散型燃料                    |
| 最大熱出力      | 20 MW                                    |
| 最大熱中性子束    | 約 $3 \times 10^{18}$ n/m <sup>2</sup> ·s |
| 炉心形状等      | 円柱（直径：60cm，高さ：75cm）                      |
| 運転形態       | サイクル運転<br>（26日連続/cy：6～7cy/年）             |
| 利用運転開始     | 平成2年                                     |
| 燃料交換本数/cy  | 2～4本/cy（約20本/年）                          |

原子炉建家鳥瞰図



実験利用棟ビームホール内部

IAEAが公開している試験研究炉データベース  
<https://nucleus.iaea.org/rrdb/#/home>



**運転中: 223 建設中または計画中: 23**

## アジア・オセアニア地区

- 日本: JRR-3(20MW), KUR(5MW)
- 中国: CARR(60MW), CMRR(20MW)
- 韓国: HANARO(30MW)
- オーストラリア: OPAL(20MW)
- インドネシア: RSG-GAS(30MW)

ビーム利用が可能な炉は 約45  
 その中で30MW以上の炉は 9

## 欧米

- 米国: HFIR(85MW), NIST(20MW)
- EU: HFR(58MW)
- ドイツ: FRM-II(20MW)

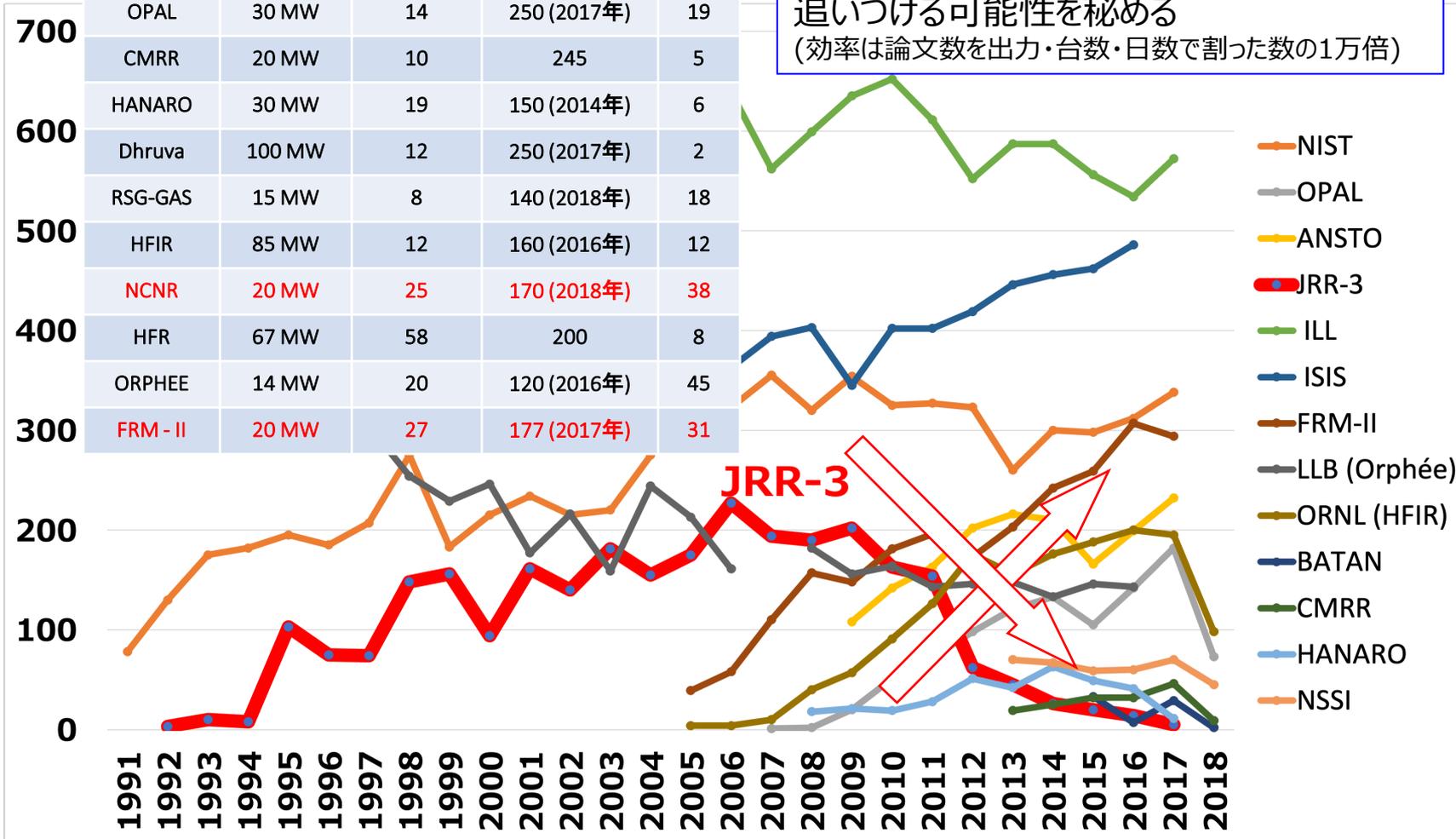


|                           |                                     |         |
|---------------------------|-------------------------------------|---------|
| SM SUT MNSR<br>Type: MNSR | Thailand<br>City: Nakorn Ratchasima | Planned |
|---------------------------|-------------------------------------|---------|

発表論文数 (\*参考値)

| 原子炉     | 熱出力    | 装置台数 | 利用可能日数      | 効率 |
|---------|--------|------|-------------|----|
| JRR-3   | 20 MW  | 31   | 170         | 19 |
| OPAL    | 30 MW  | 14   | 250 (2017年) | 19 |
| CMRR    | 20 MW  | 10   | 245         | 5  |
| HANARO  | 30 MW  | 19   | 150 (2014年) | 6  |
| Dhruva  | 100 MW | 12   | 250 (2017年) | 2  |
| RSG-GAS | 15 MW  | 8    | 140 (2018年) | 18 |
| HFIR    | 85 MW  | 12   | 160 (2016年) | 12 |
| NCNR    | 20 MW  | 25   | 170 (2018年) | 38 |
| HFR     | 67 MW  | 58   | 200         | 8  |
| ORPHEE  | 14 MW  | 20   | 120 (2016年) | 45 |
| FRM-II  | 20 MW  | 27   | 177 (2017年) | 31 |

装置の高度化と利用者の利便性向上によってFRM-IIやNCNRでの論文生産性に追いつける可能性を秘める  
 (効率は論文数を出力・台数・日数で割った数の1万倍)



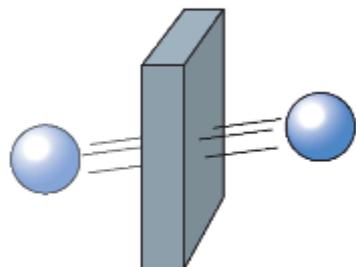
年次

\*年次報告書などにより調査した数

**JRR-3（中性子）で  
何が出来るのか？**

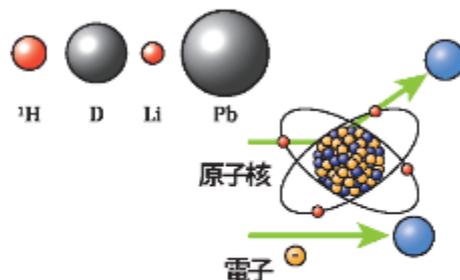
# 中性子の優れた能力

## 優れた透過力



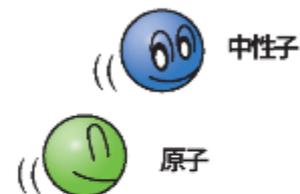
中性子は電荷を持たないので、物質を透過する能力が優れています。

## 軽元素や同位体を観る



原子核と相互作用するので、X線が苦手な電子の少ない軽元素の検出や同位体の区別ができます。

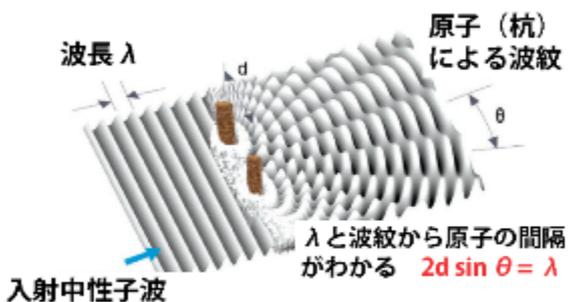
## 原子の動きを観る



お互いの動きがわかる

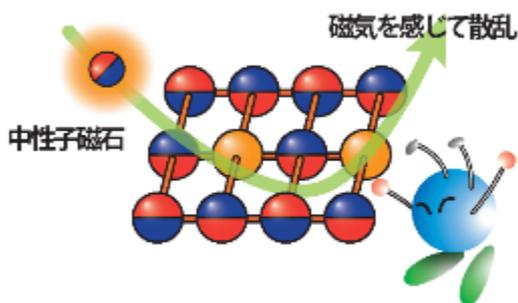
原子の運動エネルギーと同程度のエネルギーなので、原子の動きを観ることができます。

## 原子の配列を観る



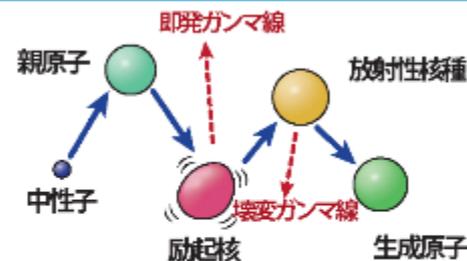
中性子は波の性質も持つので、原子配列による回折現象により結晶構造がわかります。

## 磁気モーメントの配列を観る



小さな磁石としての性質（スピン）を持ち、結晶構造のみならず磁気構造もわかります。

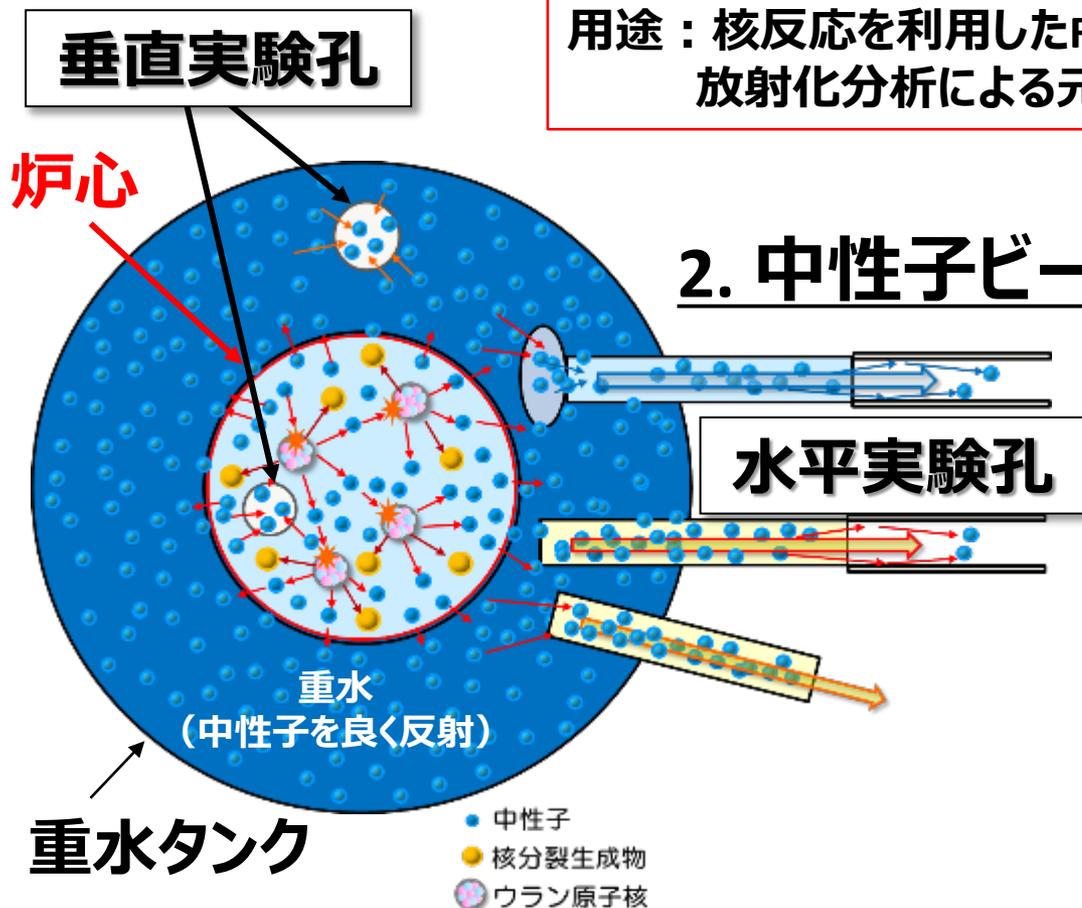
## 元素の違いを観る



物質に中性子を照射すると、その物質に固有の放射線が放出されます。この放射線(γ線)を測定することで、元素分析を行うことができます。

## 1. 中性子照射利用（重水タンク内）

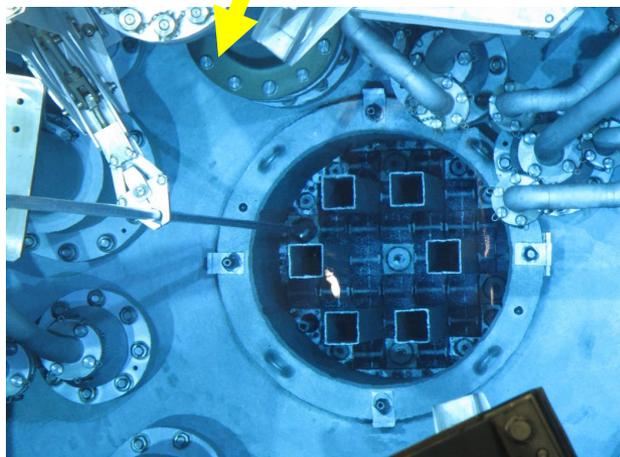
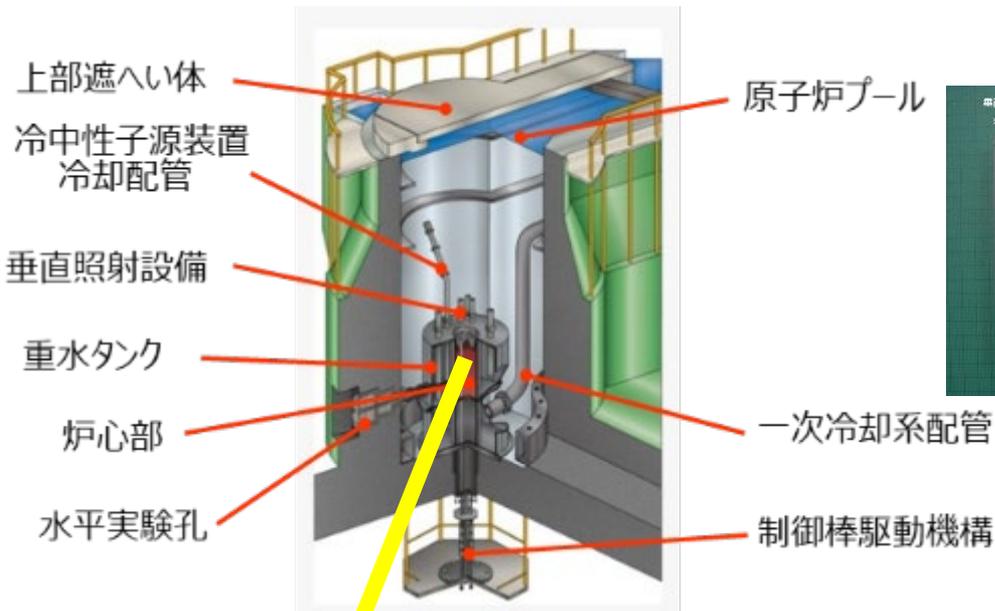
特徴：方向性のない中性子を利用  
 原理：核反応  
 用途：核反応を利用したRI製造，Si半導体製造，放射化分析による元素分析



## 2. 中性子ビーム利用（重水タンク外）

特徴：方向性を持つ中性子を利用  
 原理：散乱，回折，反射，透過  
 用途：物質のミクロな構造解析，構造物内部の非破壊観察

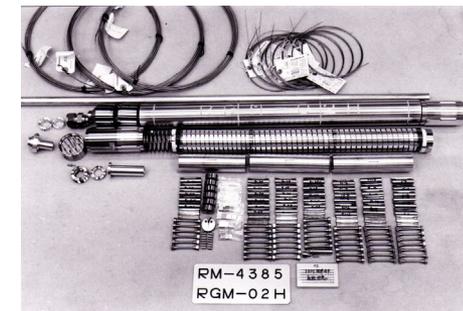
# 中性子照射利用例



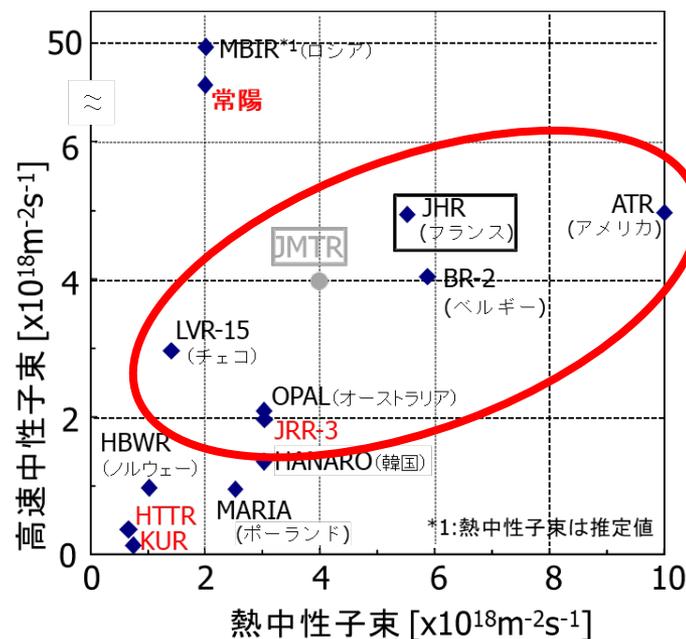
### 照射キャプセル



### 材料照射キャプセル



**JRR-3で、JMTRや海外の試験炉と遜色ない中性子照射が可能**



## 実績

約100個の材料照射キャプセルの照射試験を実施

- ・圧力容器材料(低合金鋼等)
- ・炉内構造材料(ステンレス鋼等)
- ・ウランペレット及び燃料被覆管(Zr-4)
- ・核融合炉材料(高Mn鋼, W/Cu複合材)

## 新たな取り組み

目的:原子炉圧力容器鋼などの長期運転時に関する中性子照射試験を可能にする

- 改造内容:真空温度制御とヒータ温度制御で一定温度先行制御による高精度な温度制御を実現
- 改造状況:垂直照射設備の更新が完了(令和5年12月)

## 密封小線源治療—癌を切らずに治す—

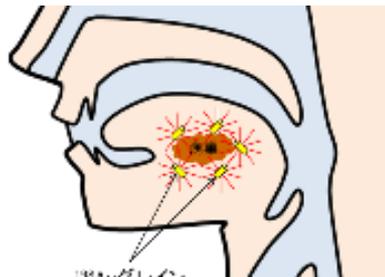
根治後の生活の質QOL (Quality Of Life) の大幅な向上が望める  
密封小線源治療用RIの製造

### 金198 (Au-198) グ레인

- 放射能 : 185 MBq/個 (検定日)
- 半減期 : 2.7 日
- 製造方法 : 水力照射孔で約50分照射
- 臨床例 : 咽頭がん, 直腸がん, 膀胱がんなど
- 施術方法 : 体内に永久刺入
- 製造出荷実績 : 50個/隔週 (約700個/年)  
(R4年度実績)



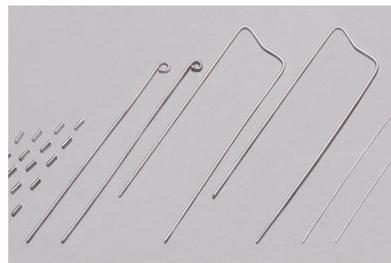
Au-198グレイン



Au-198グレインを使う  
小線源治療

### イリジウム192 (Ir-192) 線源

- 放射能 : 740 MBq/本 (ヘアピン)  
370 MBq/本 (シングルピン)
- 半減期 : 73.8 日
- 製造方法 : 水力照射孔で1~3時間照射
- 臨床例 : 舌がん, 口腔がん, 前立腺がんなど
- 施術方法 : 一時刺入後取り出される
- 製造出荷実績 : 12個/四半期 (48個)  
(R4年度実績)



Ir-192線源



Ir-192線源を使う  
小線源治療

医療用RIの国産化等を実現させるために「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」(令和4年5月原子力委員会決定)が策定

- 官民連携により実施する **国内体制を構築し、製薬企業との協力体制を構築する**。(2023年度)
- 製造技術を確立し、**JRR-3で製造したMo-99の試験供給を開始する**。(2025年度)
- **国内需要の約3割の国内製造を目指す**。(2027年度)

## 【中性子放射化法 (n,γ) によるMo-99の製造】

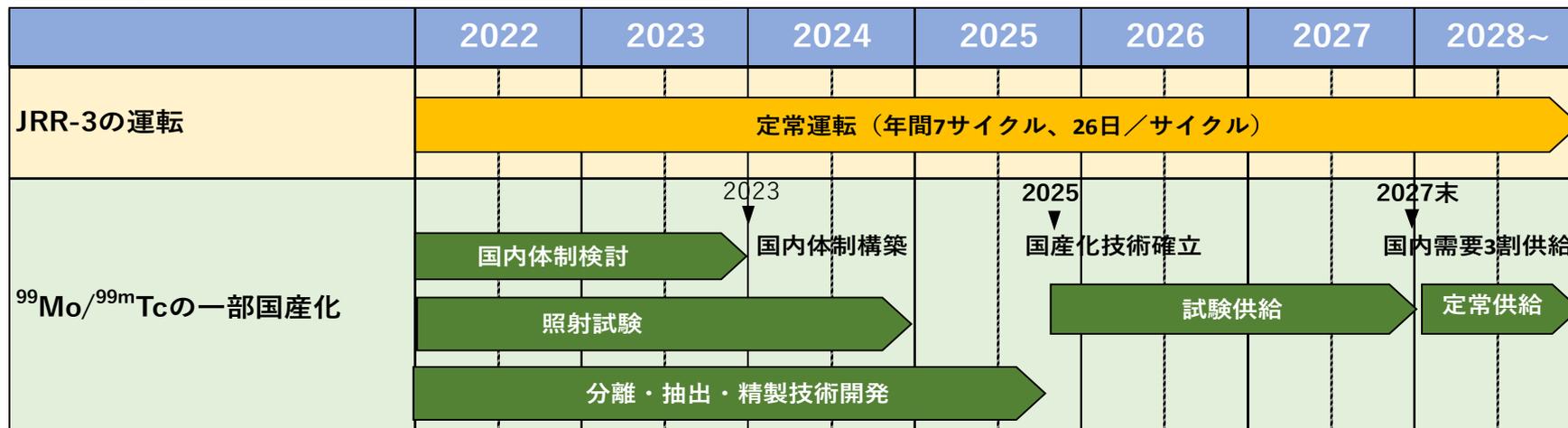
中性子捕獲によって生成されたMo-99には、ウラン235核分裂法と比較して放射性廃棄物の発生を大幅に削減しながら、後続の処理スキームを大幅に簡素化するという主な利点がある。

一方、比放射能が低いため生産性向上のための技術開発が求められる。



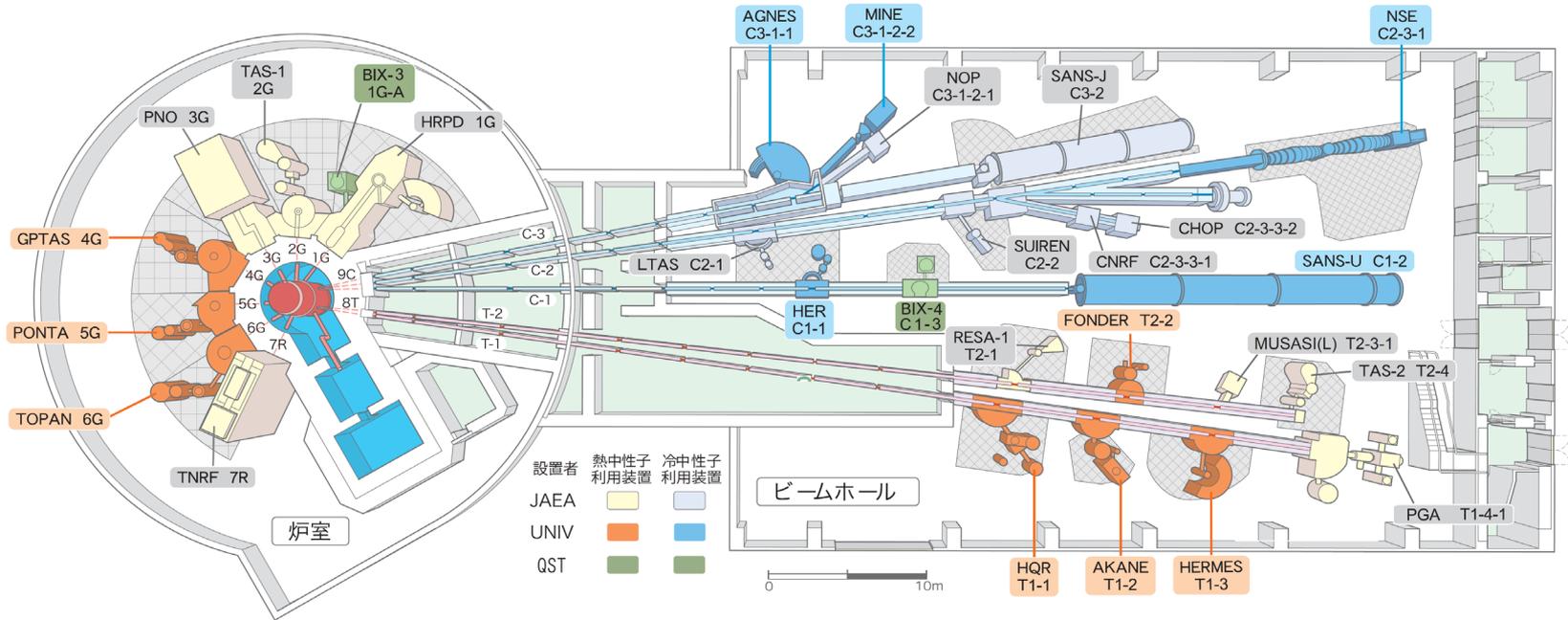
|           | 核分裂法 | 放射化法 |
|-----------|------|------|
| ウランの使用    | 有    | 無    |
| プルトニウムの生成 | 有    | 無    |
| 核拡散抵抗性    | 低い   | 高い   |
| 比放射能      | 高い   | 低い   |

## Mo-99/Tc-99m国産化に向けた年度展開



# 中性子ビーム利用例

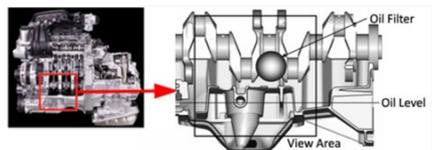
# JRR-3に設置された様々な装置群



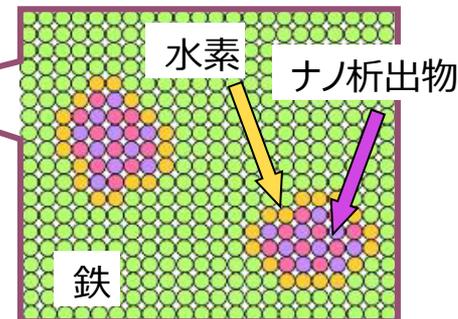
## 中性子ビーム実験装置の設置台数

日本原子力研究開発機構保有 14台  
 量子科学技術研究開発機構（量研）保有 2台  
 大学保有（東大，東北大，京大）12台

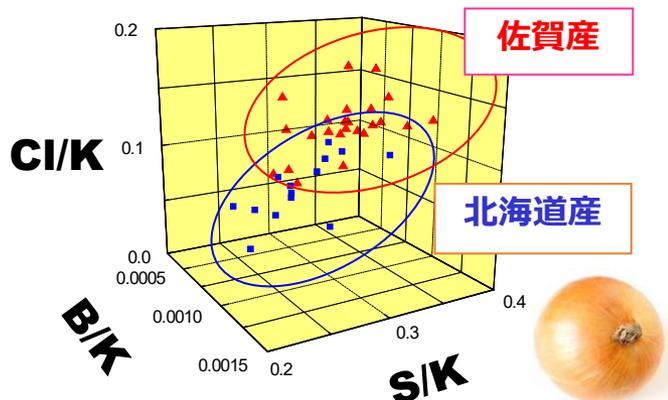
## 駆動中のエンジン内部の潤滑油の様子を可視化



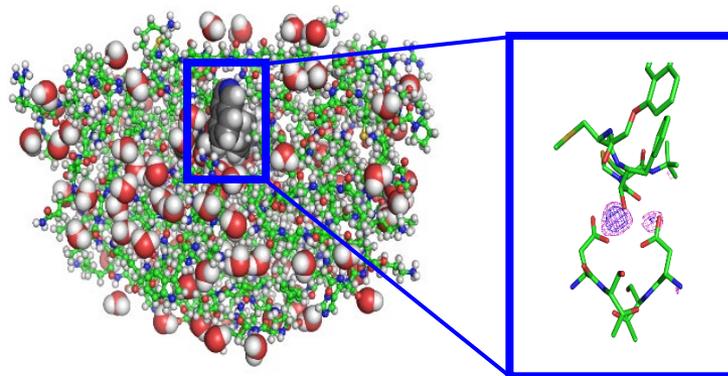
## ナノ析出物とトラップ水素構造



## 食品中微量成分の分析

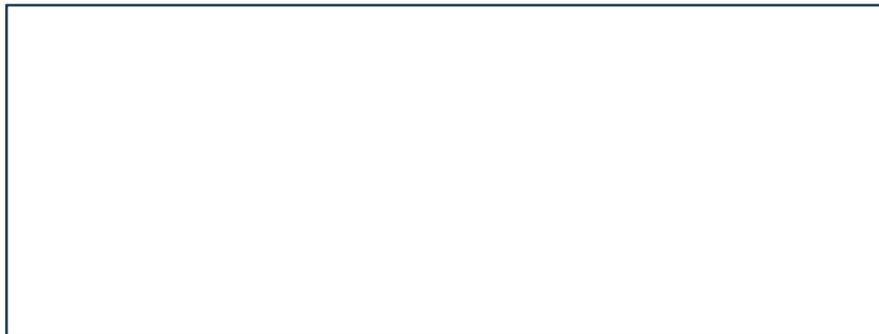


## 創薬標的タンパク質の構造決定



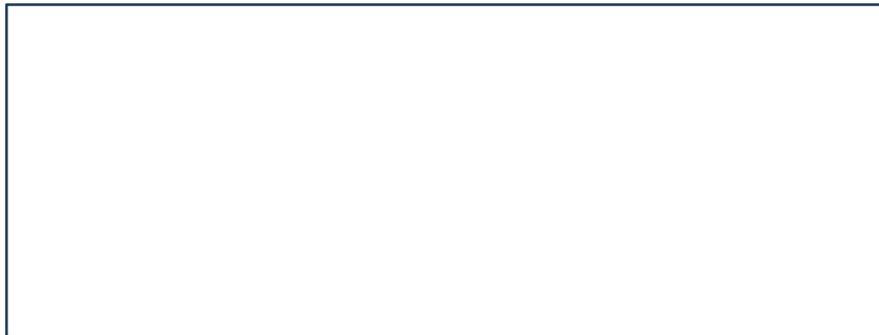
# JRR-3での学術成果例

ガラス固化用ホウケイ酸ガラスの  
ナノ構造解析 



Motokawa *et al.*, *J. Non-Cryst. Solids*. **578**, 121352 (2022)

CoTa<sub>3</sub>S<sub>6</sub> : 巨大なホール効果を生じる  
all-in-all-out磁気構造



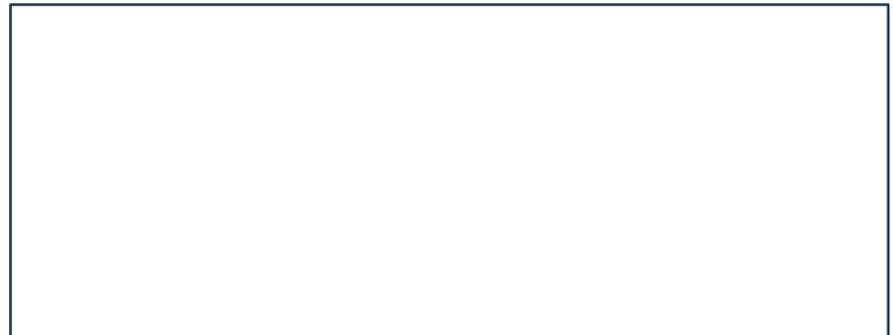
H. Takagi *et al.* *Nat. Phys.* **19**, 961 (2023)

充電中のLiイオン全固体電池中に  
おけるLiイオンの挙動解析 



Kobayashi *et al.*, *Small* **18**, 2204455 (2022)

液体ベンゼン中の氷様の水分子クラスター



K. Oka *et al.*, *J. Phys. Chem. Lett.* **15**, 267 (2024)

# 利用実績

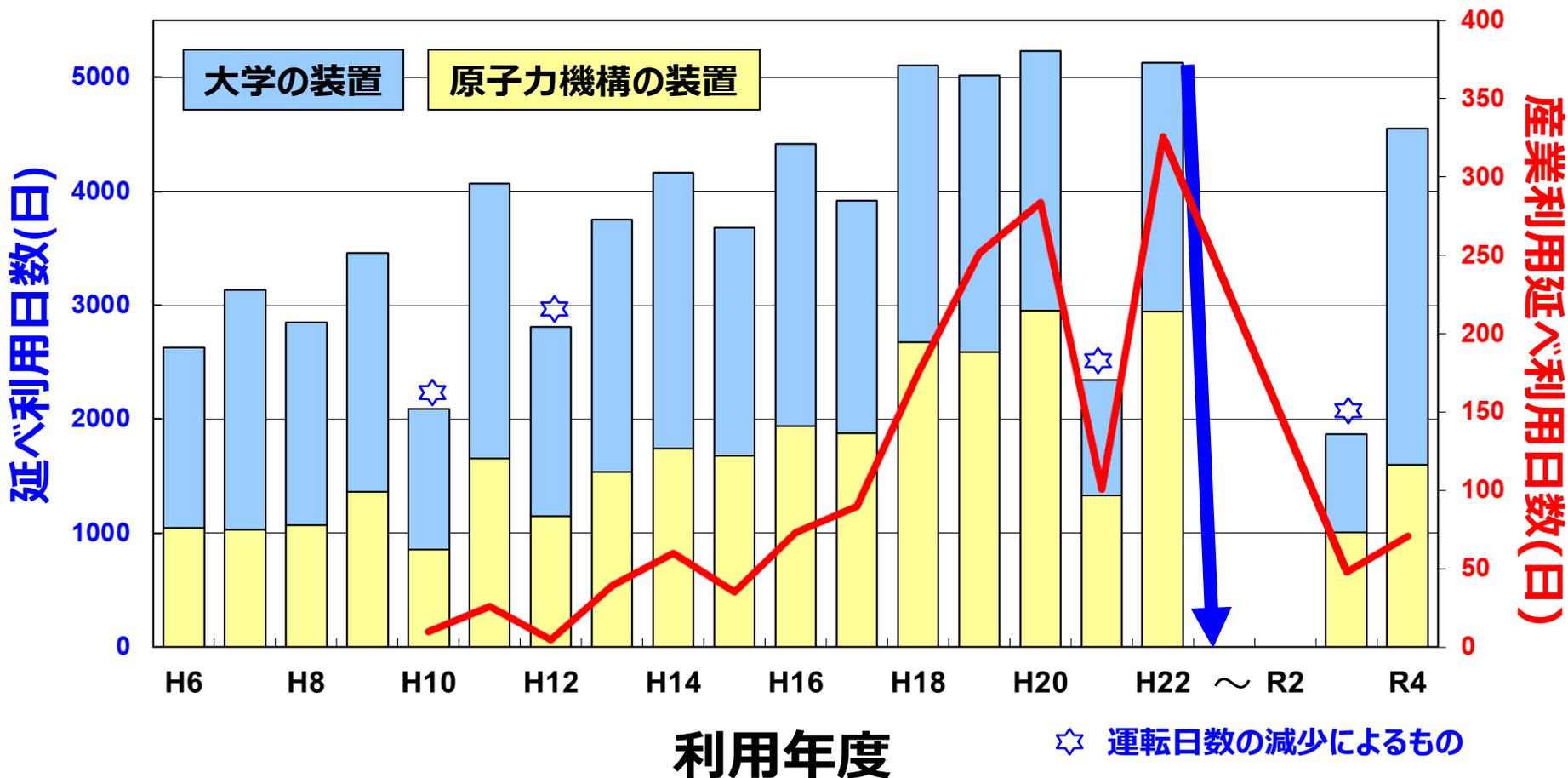
# JRR-3のビーム利用の実績



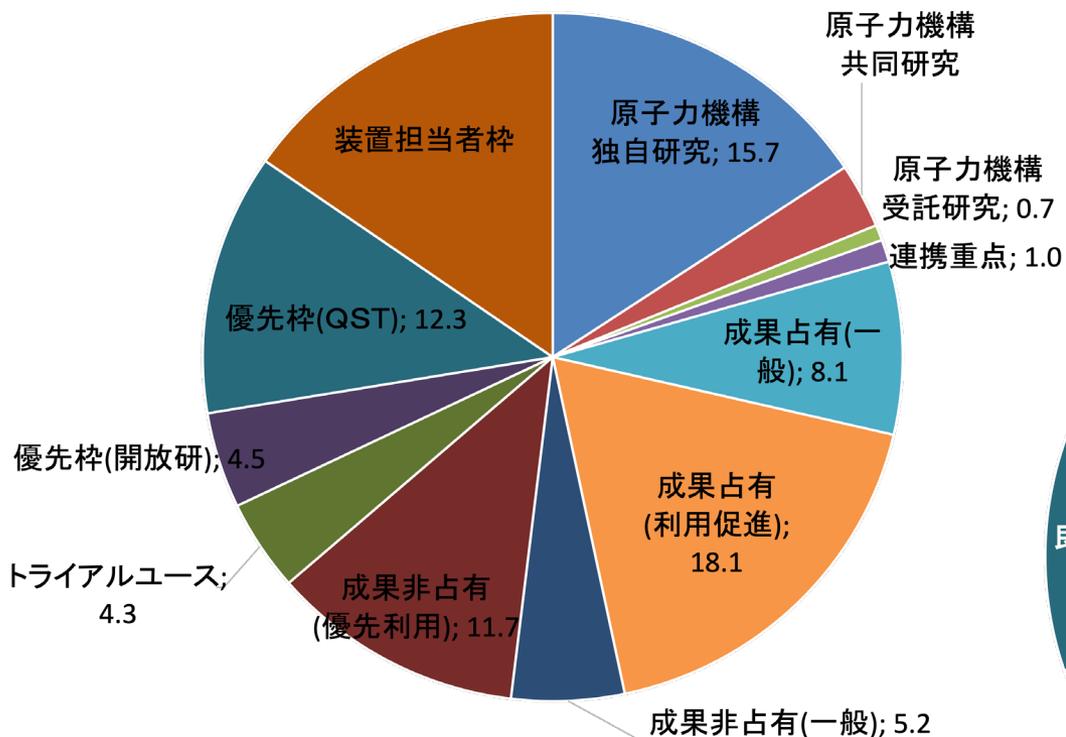
東京大学 物性研究所  
THE INSTITUTE FOR SOLID STATE PHYSICS  
THE UNIVERSITY OF TOKYO



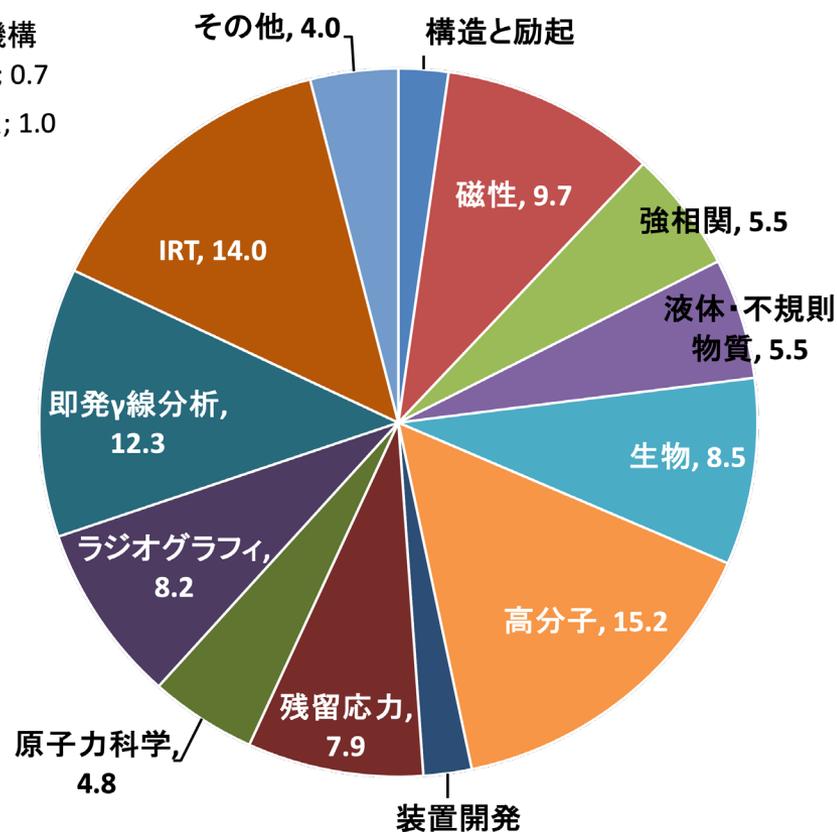
国立研究開発法人  
日本原子力研究開発機構  
Japan Atomic Energy Agency



## 利用枠分類



## 利用分野

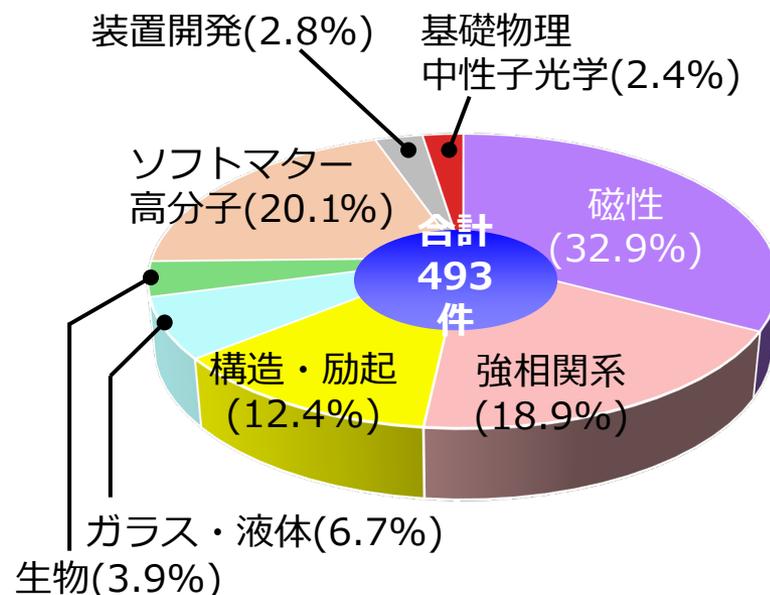


注：量子科学技術研究開発機構(QST)利用分を含む

## 東京大学物性研究所による全国大学共同利用

| 年表   |   |
|------|---|
| 1957 | 東京大学物性研究所設立   |
| 1960 | JRR-2運転開始   |
| 1960 | 中性子散乱共同利用開始   |
| 1969 | 中性子回折部門   |
| 1980 | Div. of Neutron Diffraction and Solid State Physics |
| 1990 | JRR-3運転開始   |
| 1990 | 第1回実験審査委員会  |
| 1993 | 中性子散乱研究施設(NSL)                                      |
| 1994 | 波紋施設建設  |
| 2003 | 中性子科学研究施設(NSL)                                      |
| 2010 | 高分解能チヨッパ一分光器 HRC をJ-PARCに設置                         |
| 2011 | 東日本大震災によりJRR-3停止                                    |
| 2021 | JRR-3運転再開   |

### 運転再開後の利用状況



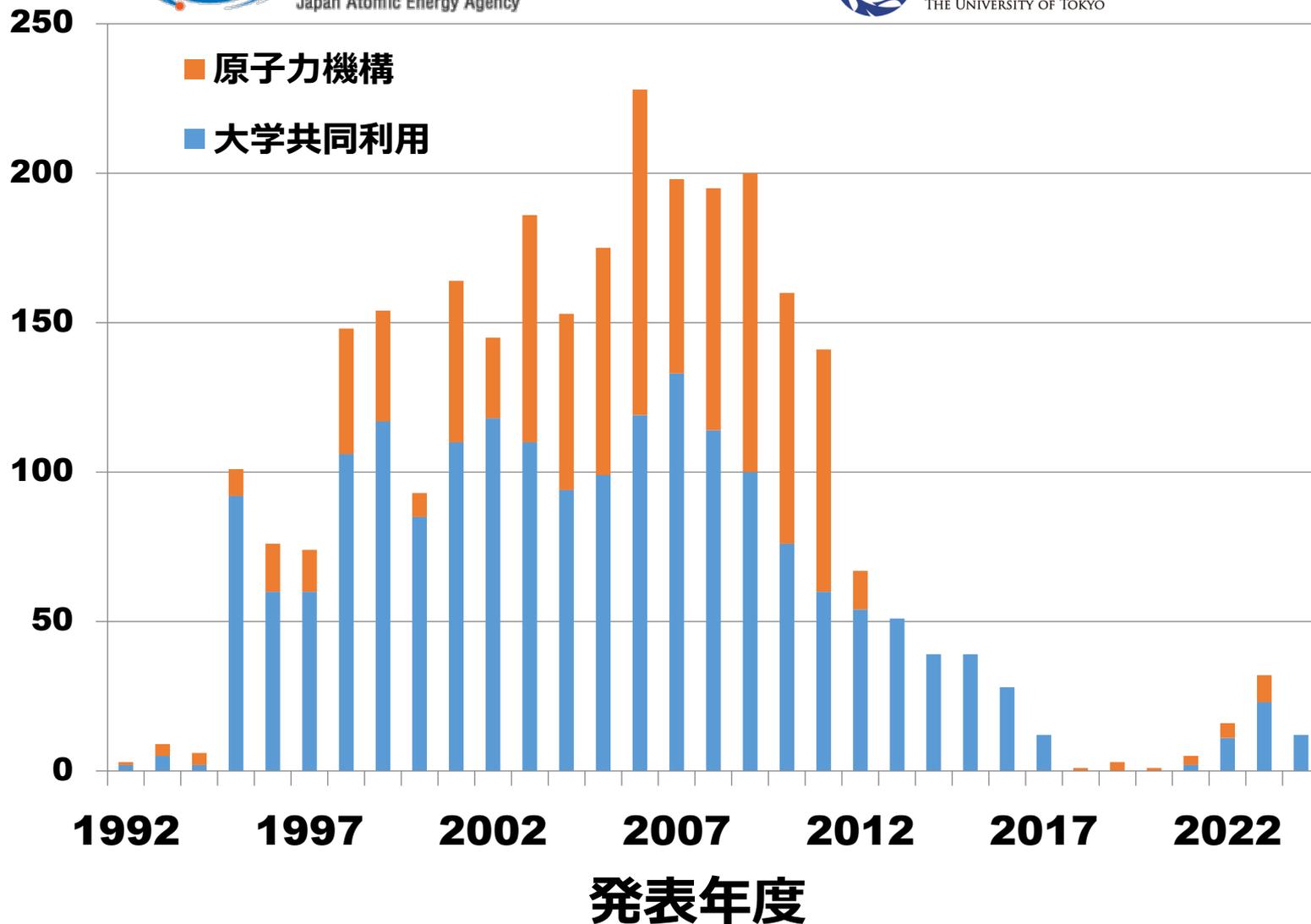
累計(2023.12.26現在)

学術論文：2,133

博士・修士論文：317

# JRR-3から出た論文数の推移

論文数



## 平成18-23年度「中性子利用技術移転推進プログラム」\* 業務実施結果報告書に記載のある企業や公的研究機関

アサヒビール, エーザイ, 協和発酵工業, 麒麟麦酒, 第一化学薬品

旭化成, 旭硝子, AGCセイミケミカル, 花王, クラレ, JSR, 資生堂, 住友ゴム工業, 東レ, 日立化成工業, 富士フイルム, 三井化学, 三菱化学

キヤノン, 住友電気工業, ソニー, 東芝, デンソー, 日立エーアイシー, 日立金属, 日立建機, 日立製作所, 日立マクセル, 富士通, 松下電器産業, リコー

関東自動車工業, スズキ, 住友重機械工業, ダイナックス, 新潟原動機, 日立エンジニアリング・アンド・サービス, 日立造船, 日立プラントテクノロジー, 三浦工業, 山野井精機, ヤマハ発動機

大同特殊鋼, 太陽鋳工, 神戸製鋼所, 新日本製鐵, JFEスチール, 住友金属工業, 日本軽金属, 日本製鋼所, フルヤ金属

ぺんてる, リコープリンティングシステムズ

社名, 組織名は報告書記載のもの

\* [https://www.mext.go.jp/a\\_menu/shinkou/ryoushi/detail/1323226.htm](https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/ryoushi/detail/1323226.htm)

# JRR-3の産業利用の実績(続き)

アート科学, イー・アンド・イー ソリューションズ, 岩通計測, 日本中性子光学,  
堀場製作所

日本核燃料開発

東洋建設, 間組

豊田中央研究所, 東レリサーチ, 住重試験検査, 日立協和エンジニアリング,  
日本板硝子テクノロジー

青森県工業総合研究センター, 青森県農林総合研究センター,  
秋田県産業技術総合センター, 石川県工業試験場, 茨城県工業技術センター,  
茨城県農業総合センター, 岩手県工業技術センター, 島根県産業技術センター,  
新潟県工業技術総合研究所, ひたちなかテクノセンター

産業技術総合研究所, 核融合科学研究所, 物質・材料研究機構,  
建築研究所, 宇宙航空研究開発機構, 放射線医学総合研究所,  
農業生物資源研究所, 食品総合研究所, 元興寺文化財研究所

# JRR-3が現状で抱える課題

## JRR-3停止の影響による海外の研究炉利用状況

2015年12月

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門

<https://jrr3uo.jaea.go.jp/pdf/topics/201603073.pdf>

### 【調査の目的】

国内の科学技術及び産業分野におけるJRR-3の重要性を示すものとして、長期停止による具体的な影響を把握することを目的とし、**JRR-3停止期間中に海外の研究炉においてビーム実験あるいは照射実験を実施された研究者・技術者の方々を対象に**、その利用状況調査を実施した。（中略）調査の結果は、上記の目的に加え、**再稼働後のJRR-3の運用の参考とする。**

**アンケート回答数 : 57件**

中性子科学会とMLF利用者懇談会の会員の内、震災後のH23～H27年にかけて海外炉を利用した研究者が主な回答者であると推定される。対象となった実施課題は139課題であり複数回の利用を含んでいることを考えると高い回答率であると判断している。

## ● 海外炉 利点

前ページで公表されているアンケート結果を要約

- ・中性子強度がJRR-3より強い
- ・学術利用（成果公開）であれば無料

## 欠点

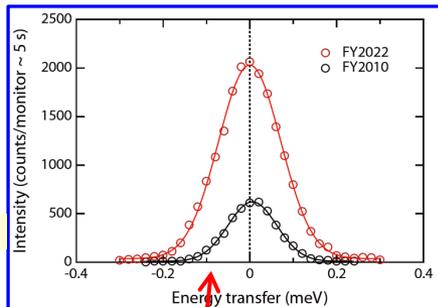
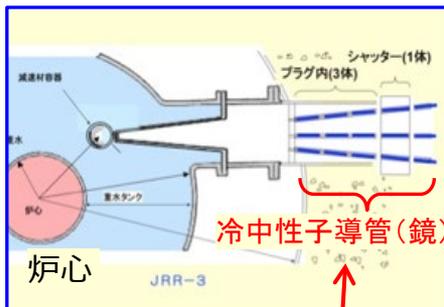
- ・大型機器や特殊な装置の移動が困難（測定の制限）
- ・費用の観点から学生に十分に経験を積ませることが困難
- ・挑戦的な課題に取り組む事が困難
- ・知財（成果，ノウハウ）の流出の危険性

## ● JRR-3

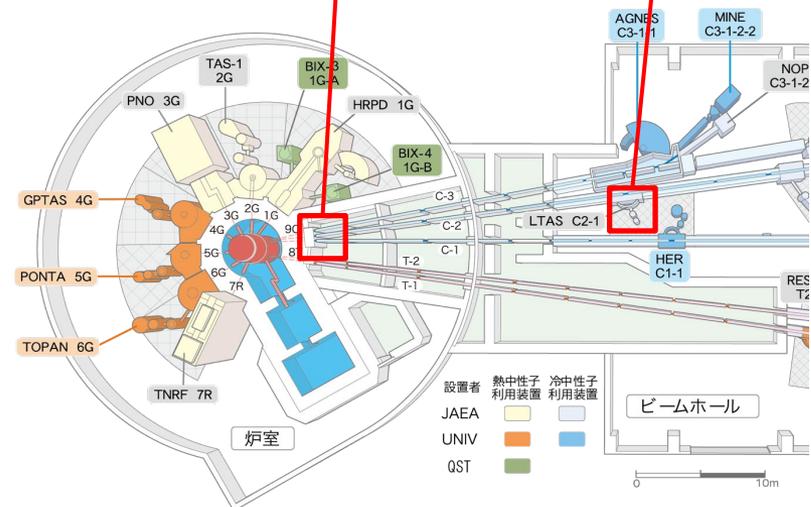
- ・基本，上記の利点と欠点が裏返し
- 専門スタッフがいる海外炉の方が利用者支援が手厚いと感じる利用者も

## 炉心に近い冷中性子導管(反射鏡)の高度化

### LTAS (C2-1)



試料位置での強度が3倍以上に増加



## 無冷媒式試料環境システムの導入による特殊環境下での基礎物性研究の促進

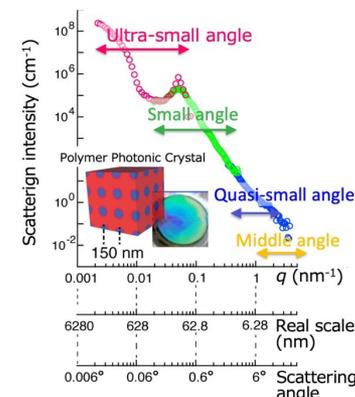
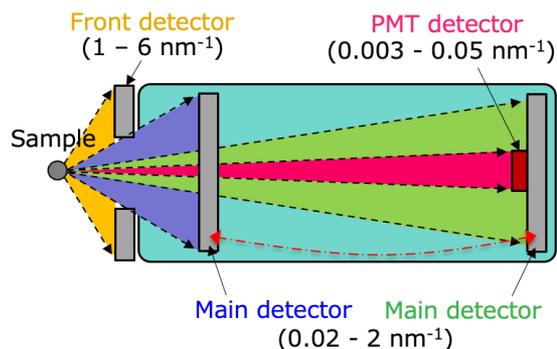
### TAS-2 (T2-4)



年間で約5000万ものコスト削減や約400人・時間のマンパワー削減に相当し、リソース不足による研究の制約から解放。今後の中性子ビーム利用施設で不可欠な設備。

## 新検出器導入による中性子小角散乱装置の測定領域拡大

### SANS-J (C3-2)



ナノからマイクロサイズまでの広い領域に渡る階層構造を1台の装置で効率的に測定可能。

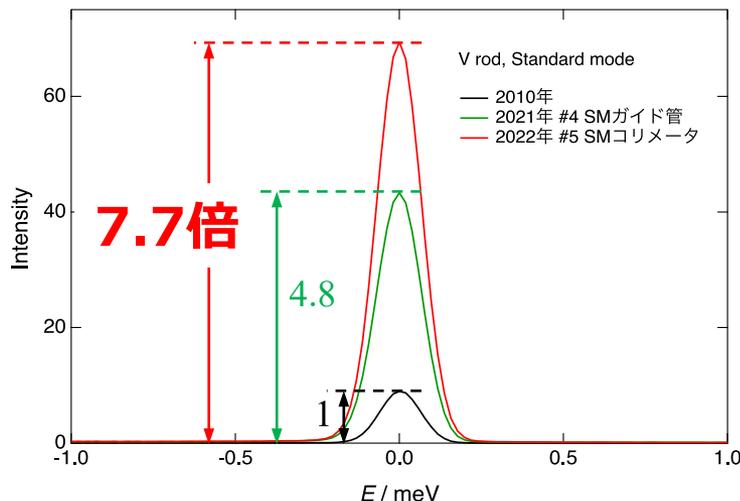
これら以外にも、高圧印加装置(10GPa)の開発, ロボットアーム導入による全自動元素分析, 高速撮像システム導入, 制御機器等の更新(高経年化対応)を行った

# 大学装置の新設・改良 (停止期間)



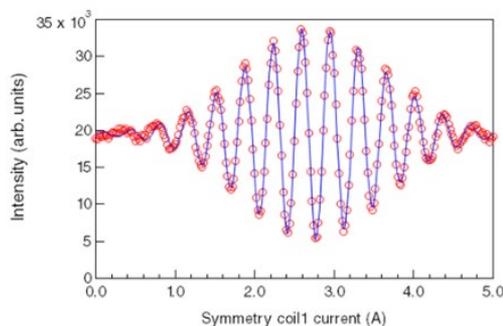
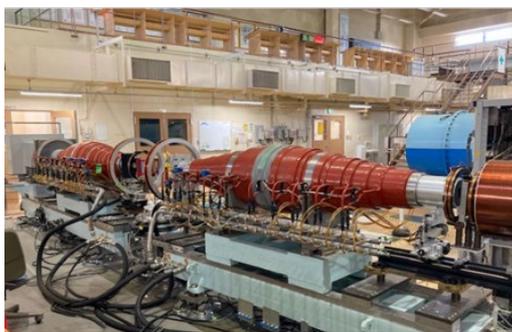
東京大学 物性研究所  
THE INSTITUTE FOR SOLID STATE PHYSICS  
THE UNIVERSITY OF TOKYO

## AGNES (C3-1-1)



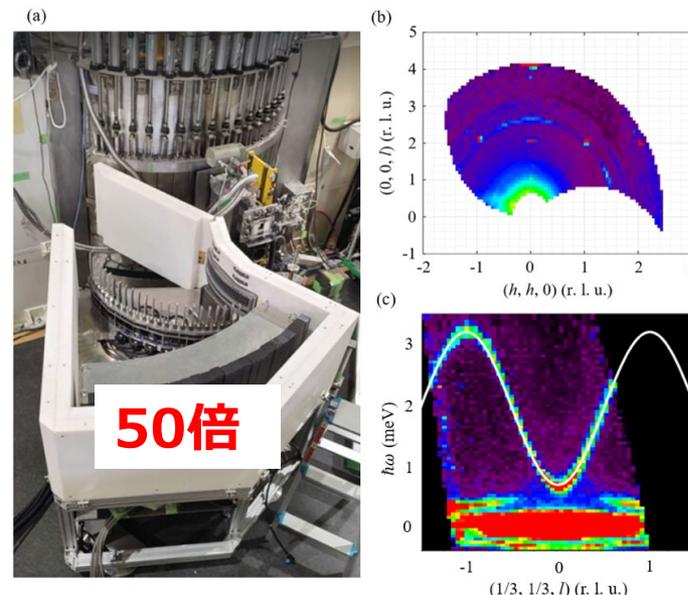
スーパーミラーガイド管・コリメータの設置により中性子強度が震災前の**7.7倍**に増強。微量試料測定，特殊環境測定が可能に。

## iNSE (C2-3-1)



震災前から長年停止していたiNSE装置を再立ち上げし，ついに**スピンエコーシグナル**を観測。iNSEはアジア・オセアニアで唯一のNSE装置である。

## HER/HODACA (C1-1)



マルチフレックス型の次世代3軸分光器HODACAが完成し運用体制に入った。測定効率はこれまでの**50倍以上**に。右図は三角格子量子反強磁性体CsFeCl<sub>3</sub>の磁気シグナル

これら以外にも，GPTAS(4G)の集光型モノクロ（強度は**10倍**に），高性能トップロードリングクライオファーネス（2.5-800K），特殊環境装置（高圧，引っ張り，光照射）など，様々な装置の新設・改良が行われた。

- **中性子利用を支える人材流出・枯渇**

停止期間の長期化による人材の流出・新たな人材の育成が停滞

- **原子炉施設・実験装置の高経年化**

法令上の制限値順守に加え，原子炉施設におけるリスクを最小化するために必要な高経年化対策が十分に進んでいない

- **実験装置の高経年化**

安全確保に加えて国際競争力の維持のためには絶え間ない装置の高度化が必須

- **施設供用制度**

JRR-3の利用窓口の一元化，また，学术界の継続的利用や産業界の利用推進のためには利用体系の再考が必要

## ● 原子力二法人の統合に関する基本報告

平成14年8月5日 原子力二法人統合準備会議

### 3. 新法人に求められる役割

- (1) 原子力の基礎・基盤研究等を総合的に推進すること
- (2) 核燃料サイクルの確立を目指した研究開発を実施すること
- (3) 原子力安全研究を実施するとともに、緊急時対応等への支援を行うこと
- (4) 産学との連携・協力の推進及び原子力研究開発基盤の確立
  - 1 大学との連携・協力を充実・強化すること
  - 2 産業界との連携・協力を充実・強化すること
  - 3 研究施設及び設備の共用を促進すること**
- (5) 原子力平和利用に徹する原子力国際協力及び国際核不拡散の強化に寄与すること

新法人は、総合的な原子力の研究開発の中核的拠点（**COE**）の役割の一つとして、我が国の原子力研究開発の基盤として必要不可欠な施設及び設備であって、大学や民間企業などの新法人以外の機関には保有、維持が困難なものを整備し、その効率的・効果的な活用によって原子力利用の高度化・多様化に資する研究開発を実施するとともに、これらの施設及び設備を大学及び産業界にこれまで以上に積極的に開放することによりその共用を促進し、大学及び産業界における原子力研究開発の進展に大いに寄与すべきである

# JRR-3への期待

1. J-PARCと双璧をなす国内唯一の大型中性子源として学術的基礎研究から、実用材料の性能向上、新奇材料の開発に至る産業利用を通して、SDGsへの貢献も含むイノベーション創出のために重要な研究基盤としての役割
2. 将来、新試験研究炉で活躍する人材（研究者、技術者）を実地育成することのできるビーム炉として国内唯一の研究基盤
3. 新試験研究炉のための高性能・高機能装置デバイス開発や、設置前の装置を事前に試験したり改良することのできる研究基盤

上記2,3が機能するためには、これまでその一部をになってきたKURでの活動を継続し、大学や企業に所属する研究者・技術者との人材交流が必要不可欠。さらに、海外経験を踏むことも重要

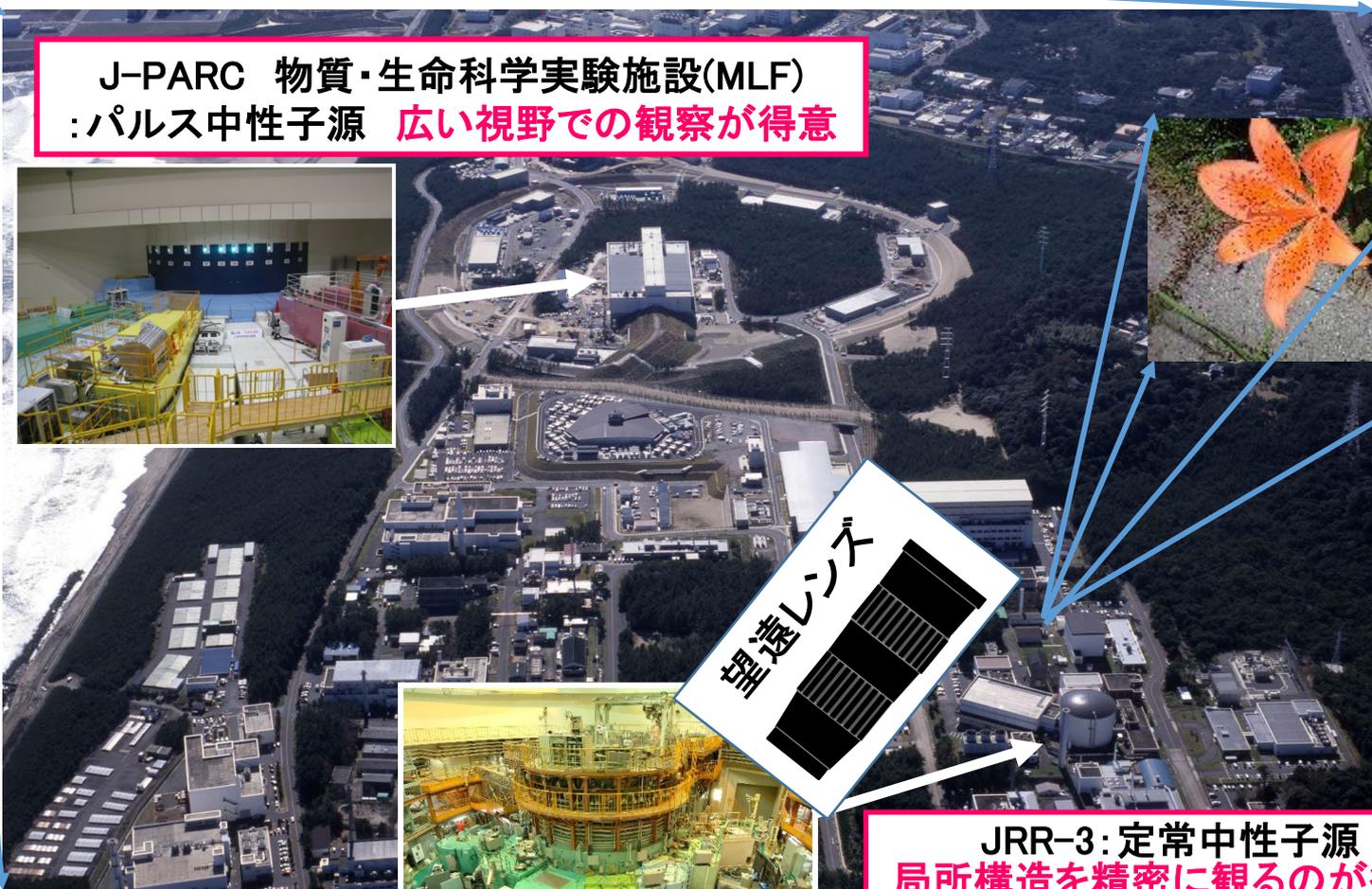
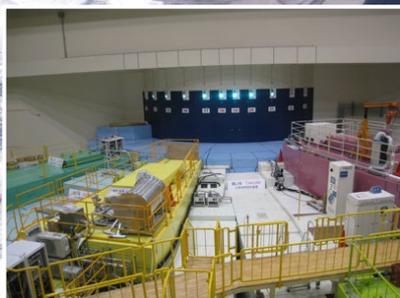
# 參考資料

# 東海村のふたつの大強度中性子源

広角レンズ

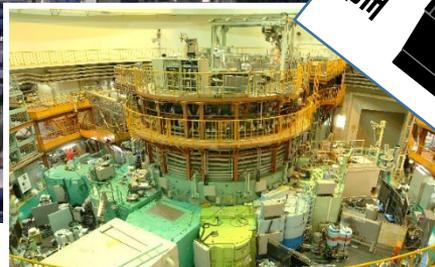
原子力科学研究所(東海村白方2番地4)

J-PARC 物質・生命科学実験施設(MLF)  
:パルス中性子源 広い視野での観察が得意



スカシユリ  
(原研構内撮影)

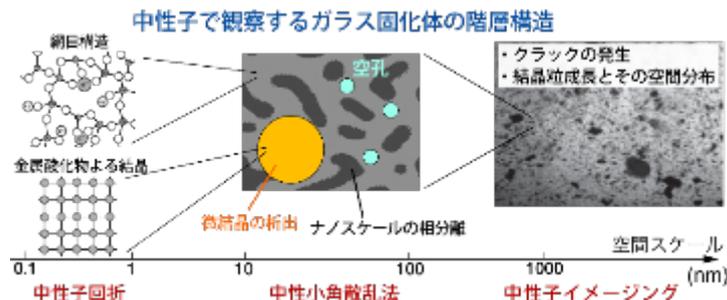
望遠レンズ



JRR-3: 定常中性子源  
局所構造を精密に観るのが得意

## 1. 放射性廃棄物封じ込め用ガラスの安定化が実現される微視的機構を解明

"Nanoscopic structure of borosilicate glass with additives for nuclear waste vitrification", R. Motokawa *et al.*, J. Non-Cryst. Solids **578**, 121352 (2022).



- JRR-3の中性子小角装置でナノスケール構造を
- J-PARCのイメージング装置で添加元素の分布を調べ、ガラスの構造の様々なスケールでの乱れとガラスに使われる添加剤の関係を調べた。Li酸化物が構造の乱れを抑える様子を確認。

## 2. 超高密度な磁気渦を示すシンプルな2元合金物質を発見

※2022.3.30プレスリリース (東京大学, RIKEN, JAEA, CROSS)

"Square and rhombic lattices of magnetic skyrmions in a centrosymmetric binary compound"  
R. Takagi *et al.*, Nat. Commun. **13**, 1472 (2022).

スカームオンと呼ばれるマイクロな原子磁石 (スピン) の渦構造を持つ新たな物質を

- J-PARCの装置で全体像を
- JRR-3の装置でそのスピンの並び方を調べて、見いだした。

## 3. 特異な構造を持つ銅酸化物高温超伝導体の超伝導と酸素元素位置の関係を解明

"Reduction Annealing Effects on the Crystal Structure of  $T'$ -type  $\text{La}_{1.8}\text{Eu}_{0.2}\text{CuO}_{4+a-\delta}$ "  
M. Fujita *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 105002 (2021).

ドーブなしで超伝導を示す $T'$ 構造の2-1-4型銅酸化物超伝導体について、その超伝導機構の由来を探るべく、酸素処理の違いによる酸素原子位置の変化を

- J-PARCの装置で全体像を
- JRR-3の装置でさらに詳細部分を調べて、解明した。