2023年2月26日
放射線教育フォーラム
令和4年度第3回勉強会

京都大学研究用原子炉の現状と今後

京都大学複合原子力科学研究所
中島　健

KURNS

研究用原子炉（研究炉）とは

研究炉の役割による分類

これまで我が国に設置された研究炉の役割は主に以下のとおり

- 中性子ビーム利用（ビーム炉）
  中性子をプローブとして分析等を行う炉：JRR−3、KUR等
- 材料照射（照射炉）
  各種材料等の中性子照射を行う炉：JMTR等
- 新型原子炉開発
  新しい原子炉開発のための炉：HTTR、常陽等
- 炉物理実験（臨界実験装置）
  臨界量等の核的特性研究を行う炉：STACY、KUCA等
  原子炉物理の実習（人材育成）にも有用

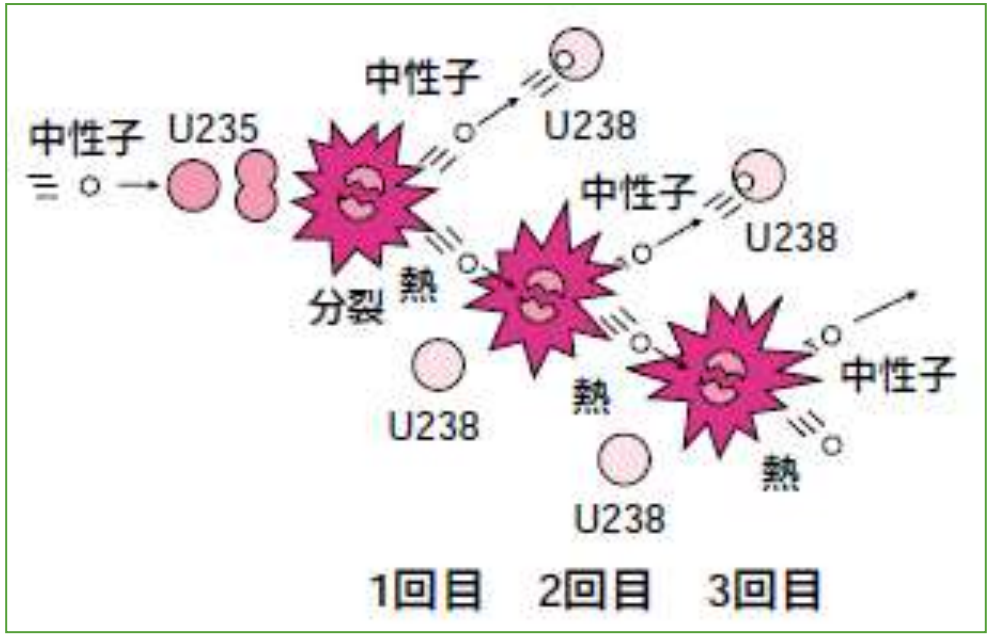
日本の研究炉の現状

名称	型式	出力 (kW)	運転開始年	用途	運転再開日（定検終了日）	設置者
JRR-3	プール型	20,000	1990	多目的利用	2021/2/26	JAEA東海
JRR-4*	プール型	3,500	1965	多目的利用		
NSRR	トリガ炉 (パルス)	300 (23,000,000)	1975	燃料挙動実験	2020/3/24	
TCA*	臨界装置(C.A.)	0.2	1962	炉物理実験		
FCA*	C.A. 高速炉	2	1967	炉物理実験		
STACY	C.A. 均質炉	0.2	1995	炉物理実験	（非均質炉に改造中）	
TRACY*	均質炉 (パルス)	10 (5,000,000)	1995	臨界事故実験		
JMTR*	タンク型	50,000	1968	多目的利用		JAEA大洗
HTTR	高温ガス炉	30,000	1998	HTGR プラント試験	2021/9/22	
JOYO	高速炉	140,000	1977	FBR 燃材料照射		
NCA*	C.A.	0.2	1963	炉物理実験		東芝
UTR -KINKI	アルゴノート型	0.001	1961	多目的利用	2017/4/12	近畿大学
KUR	タンク型	5,000	1964	多目的利用	2017/8/29	京都大学
KUCA	C.A.	0.1	1974	炉物理実験	2017/6/21	

＊廃止決定（6基）

出典　原子力総合シンポジウム2022資料　https://www.aesj.net/genshiryoku-symp2022

核分裂反応（原子炉内の反応）



出典：原子力・エネルギー図面集2008年版, (財)日本原子力文化振興財団

中性子がウランなどの重たい原子核にぶつかると、ある割合で原子核が中性子を吸収する。

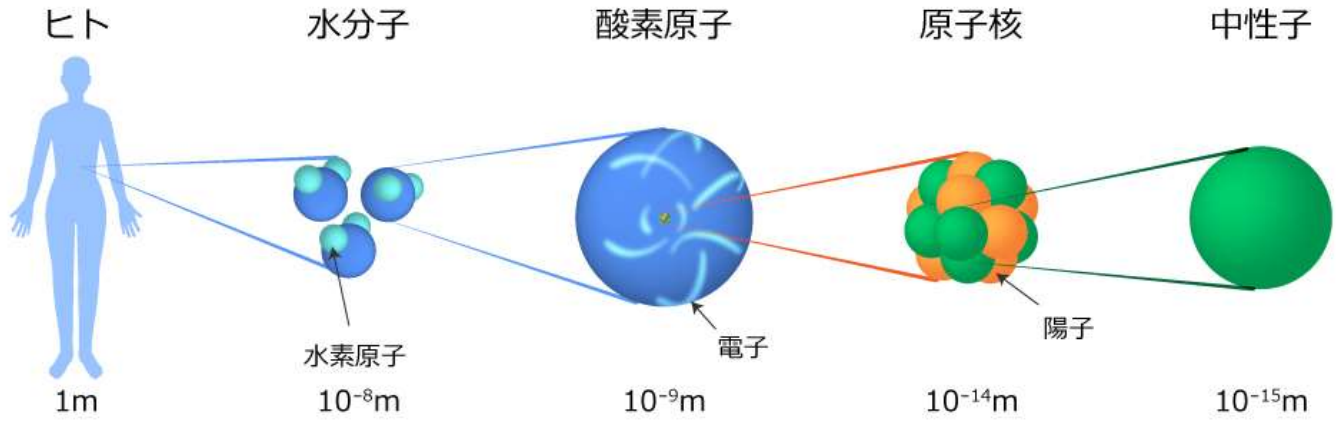
中性子を吸収して不安定になった原子核が、ある割合で割れる（分裂する）。

このときに、大きなエネルギーが発生する（石油や石炭の100万倍）。また、2-3個の中性子が生まれる。

核分裂で発生した中性子が、別のウランにぶつかり、そこでまた核分裂を起こすと、核分裂が次から次に起こるようになる（核分裂連鎖反応）。

ウラン（U）は原子番号（陽子数）92の元素であり、中性子数の異なる同位体がある。
天然ウランの同位体は次の3種類: U234(存在比0.0054%),U235(0.72%),U238(99.275%)
このうち核分裂する（しやすい）のは U235

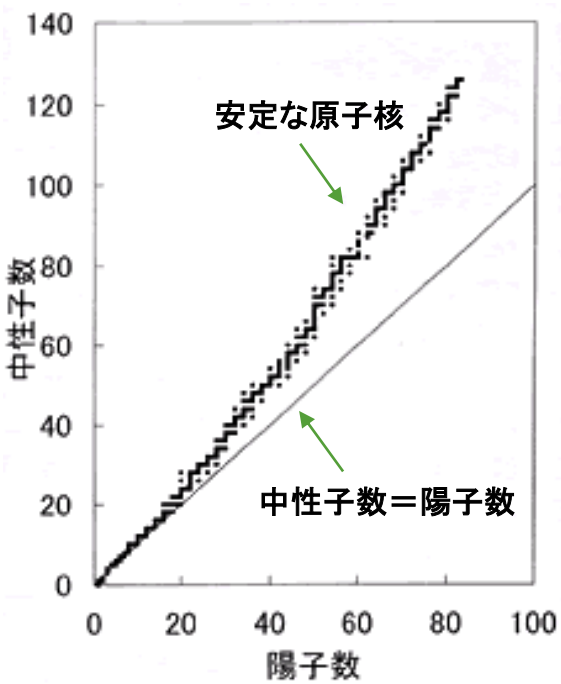
中性子とは



出典
https://mlfinfo.jp/ja/aboutmlf/neutron.html

- 陽子とともに原子核を構成する粒子（＝核子）
- 質量は陽子と同じ（少し（0.14%）だけ重い）で電荷をもたない
- 磁石の性質（磁気モーメント）をもつ
- 自由な中性子は半減期約10分でβ崩壊し、陽子となる

原子核が安定なのは、核子（陽子、中性子）間に働く、核力が働いているため
核力はごく近くにしか働かないが、電荷をもつ陽子間のクーロン力は遠距離まで働く、このため陽子数が増えてくると、原子核は不安定となる
陽子数が大きな核（重い核）では、「核力」により原子核を安定化させるため、電荷をもたない中性子数がより増える（中性子過剰核）

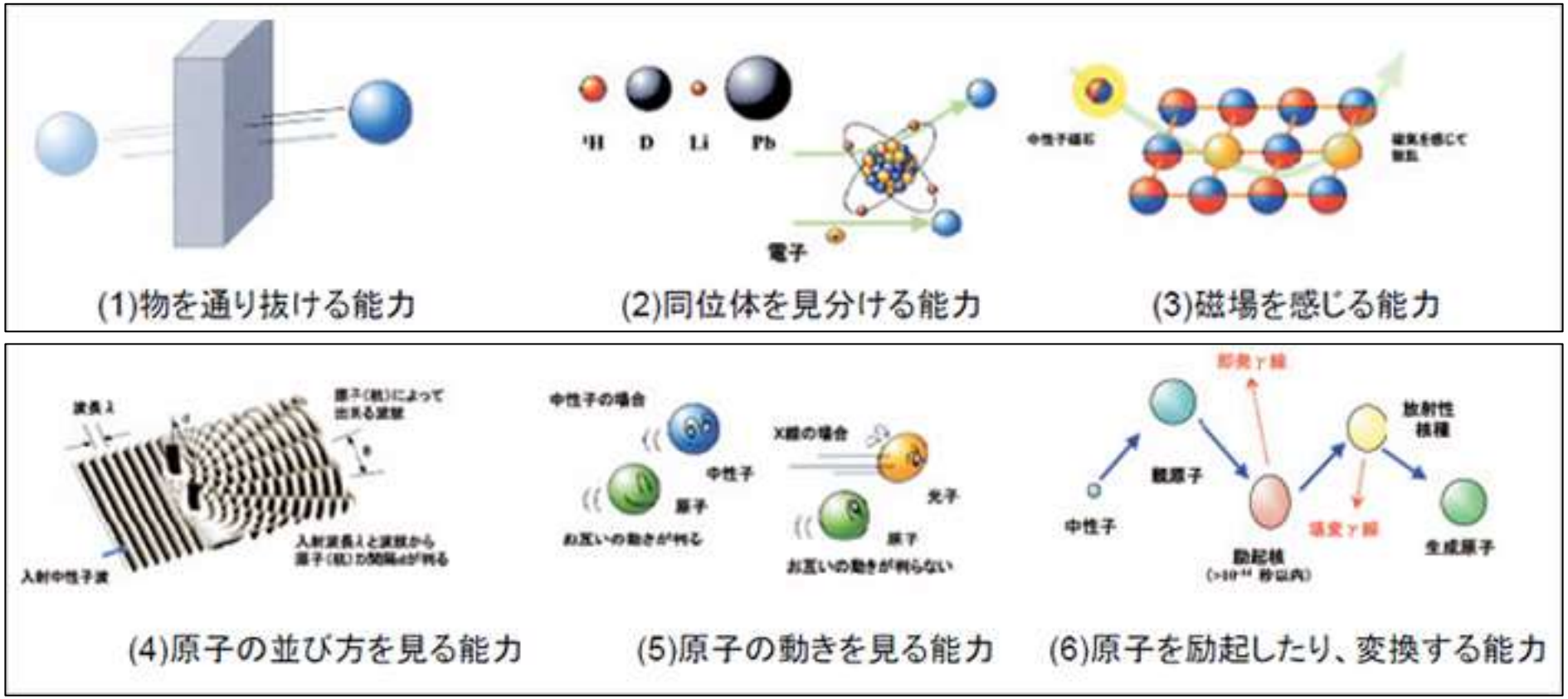


出典
https://www.ies.or.jp/publicity_j/mini_hyakka/62/mini62.html

中性子の特徴（能力）

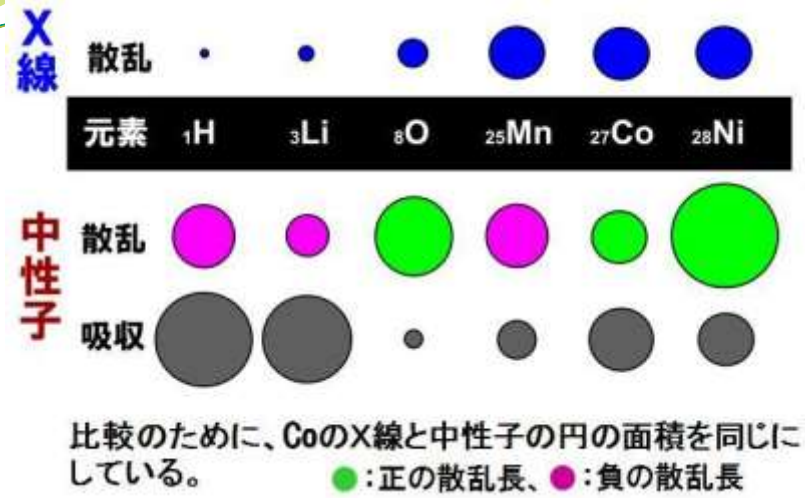
中性子に電荷はない（透過力が高い） ➡ 原子核と直接反応する
磁石の性質がある（磁場の影響を受ける） 散乱（弾性、非弾性）、吸収(捕獲、核分裂）

原子・分子の構造に敏感（散乱反応） **同位体（原子核の構造が異なる）を区別**
原子・分子の運動に敏感（散乱反応） **原子核の状態を変える（核変換など）**



出典 https://www.jaea.go.jp/04/ntokai/technical/analysis/analisis_04.html

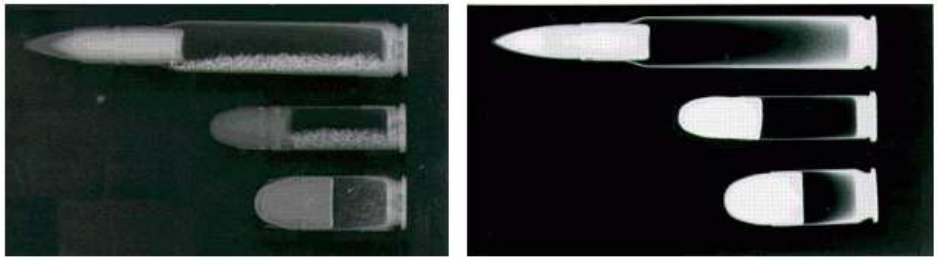
中性子とX線の違い



出典 https://rada.or.jp/neutron/what/

反応の起こりやすさ

- X線は原子番号（原子核の重さ）が大きくなるにつれて、反応が起こりやすくなる（X線写真では重い核が影となって映る）
- 中性子は軽い核でも反応を起こしやすいものがある。（反応しやすさは同位体に依存する。）

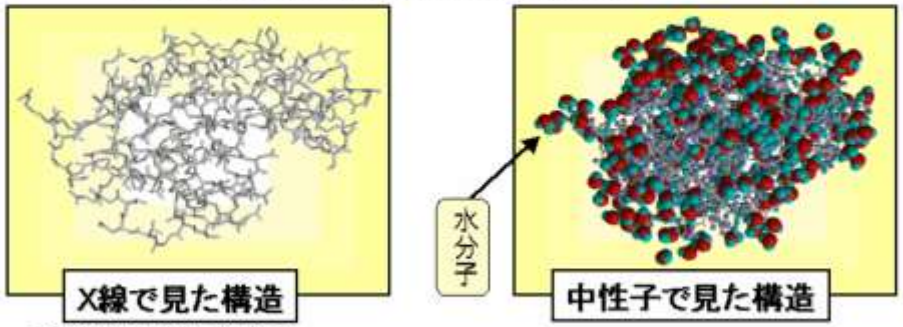


中性子ラジオグラフィ(NRG)像　　X線透過像

図2　中性子ラジオグラフィ像およびX線透過像

[資料提供]科学警察研究所：黒木健郎、立教大原研・小林久夫

出典　https://atomica.jaea.go.jp/data/fig/fig_pict_08-04-01-18-06.html



下記の出典をもとに作成した。

図6　研究炉を利用した中性子散乱研究

[出典]長期計画策定会議第四分科会(第2回)：資料第4号、スライドNo.3（1999年11月26日）

出典　https://atomica.jaea.go.jp/data/fig/fig_pict_03-04-01-05-06.html

京都大学研究用原子炉：KUR ➡ 中性子を利用するための装置

(Kyoto University Research Reactor)

水冷却型研究炉（最大熱出力5,000kW）
短期の冷却が必要

ウラン濃縮度約20%の板状燃料を使用

- 1964年6月：初臨界（同年8月1,000kW達成）
- 1968年7月：5,000kW達成（出力アップ）
- 2010年5月：低濃縮ウラン炉心に移行

出典　https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/facilities/kur

京都大学臨界実験装置：KUCA

(Kyoto University Critical Assembly)

原子炉の基礎的研究を実施

- 初臨界:1974年8月
- 最大熱出力 100W ：冷却不要
- 複数架台（炉心）方式
  - 軽水減速架台（C架台）
  - 固体減速架台（A、B架台）
    （減速材：ポリエチレン、黒鉛など）

停止のみでOK

出典　https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/facilities/ca

研究炉と発電炉の比較

	研究用原子炉KUR	福島第一発電所
目的	中性子発生（研究用）	発電
運転状態	低出力、低温、低圧	高出力、高温、高圧
熱出力（kW）	5000	1号機：138万 2～5号機：238万 6号機：329万
燃料（集合）体の重さ（kg）	約6	約250
ウラン装荷量（トン）	最大0.037	1号機：69 2～5号機：94 6号機：132
原子炉内の水量（トン）	約25	約400（6号機の場合）
運転中の温度（℃）	約55以下	約285
運転中の圧力	大気圧	約70気圧

KUCAは
冷却不要

停止後の燃料の冷却
は短期間で可

停止後も長期にわたる
燃料の冷却が必要

KUR（出力5,000kW）の場合、停止後の発熱量が小さいため、燃料はタンク内の水の自然循環で冷却可能であり、冷却のための電源等は不要。

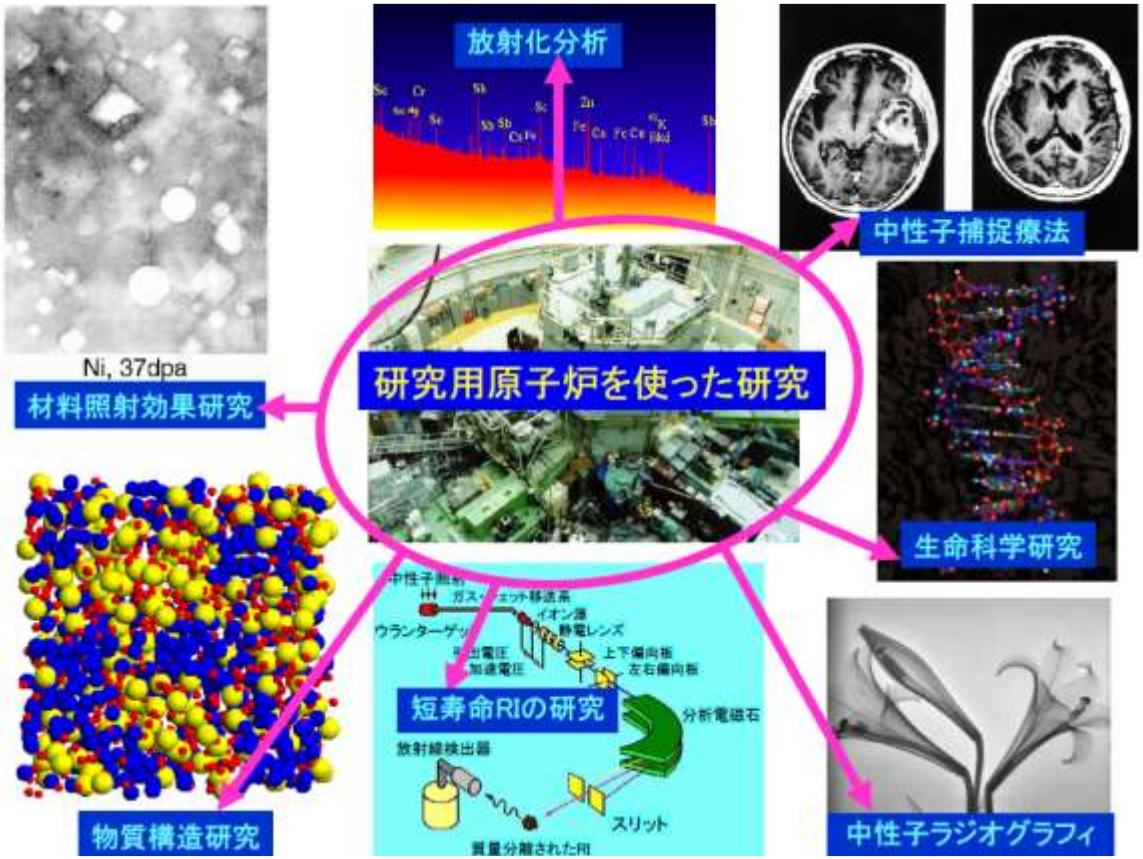
京都大学研究用原子炉：KUR

タンク型の軽水冷却軽水減速熱中性子炉（出力5MW）
中性子源としての利用が主

一般研究、材料照射、放射性同位元素生産、開発研究および教育訓練を目的とした研究用原子炉

主な利用内容（研究テーマ）

- 中性子ビーム利用
  中性子散乱・回折、ラジオグラフィ等
- 中性子照射
  放射化分析、RI製造等
- その他
  医療照射（BNCT）、陽電子ビーム利用
- 教育
  主に京大の学生・院生



出典　https://www2.nra.go.jp/data/000372919.pdf

KURの実験設備

■ 各種の中性子照射設備と中性子ビームポートを設置

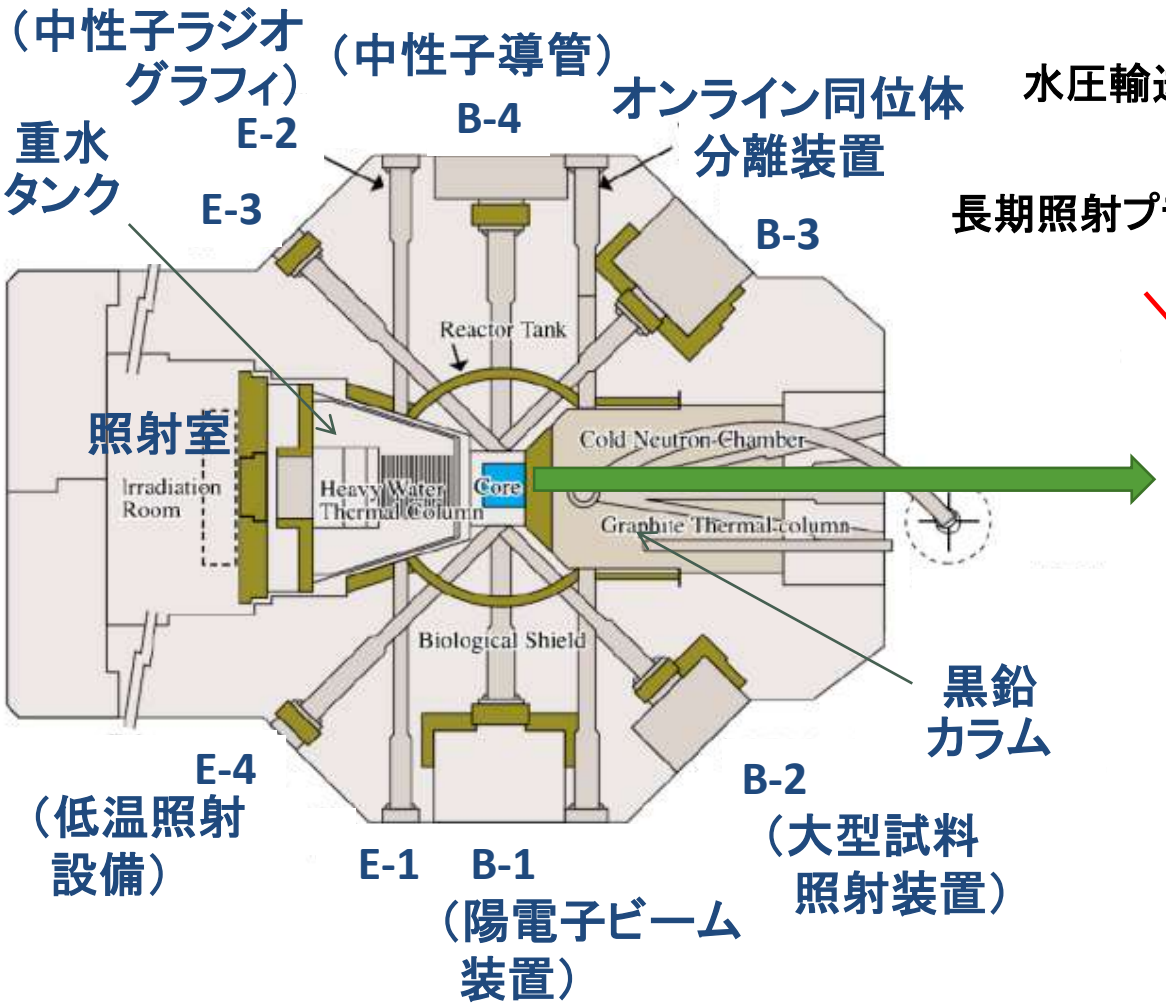


Fig. Plane view of KUR

水圧輸送管

長期照射プラグ

精密照射装置

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
い	G	R-rod	F	F	F	F	SSS	G	G
ろ	G	G	F	A-rod	F	B-rod	F	G	G
は	G	LI-PI	F	F	Hyd	F	F	G	G
に	G	G	F	C-rod	F	D-rod	F	G	Pn-2
ほ	G	G	F	F	F	F	F	G	Pn-3
へ	G	G	G	G	G	G	G	G	Pn-1

Fig. Configuration of KUR core

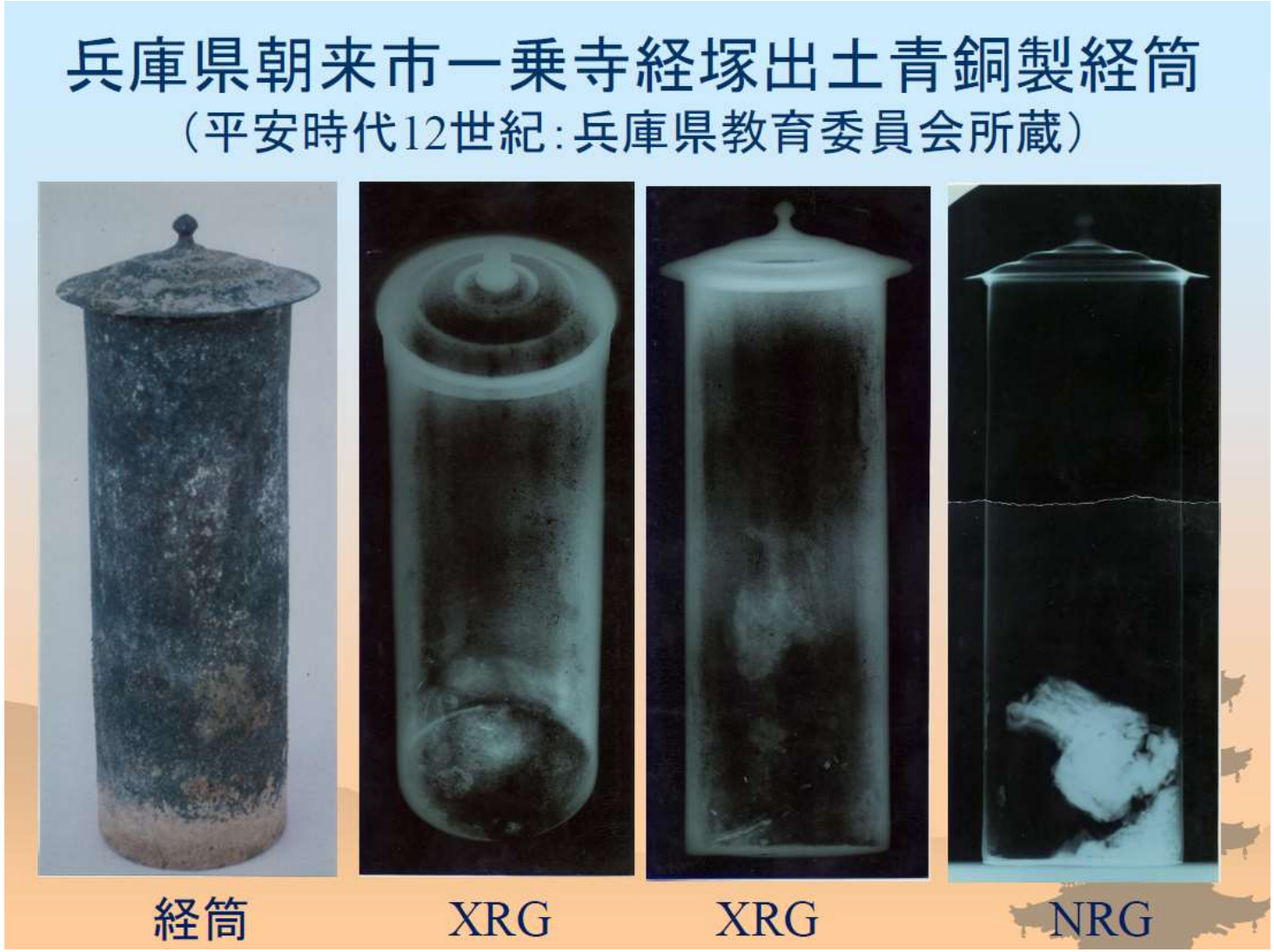
圧気輸送管

出典　https://www2.nra.go.jp/data/000372919.pdf

中性子イメージング（中性子ラジオグラフィ）

金属を透過し、水素に敏感

（元興寺文化財研究所）

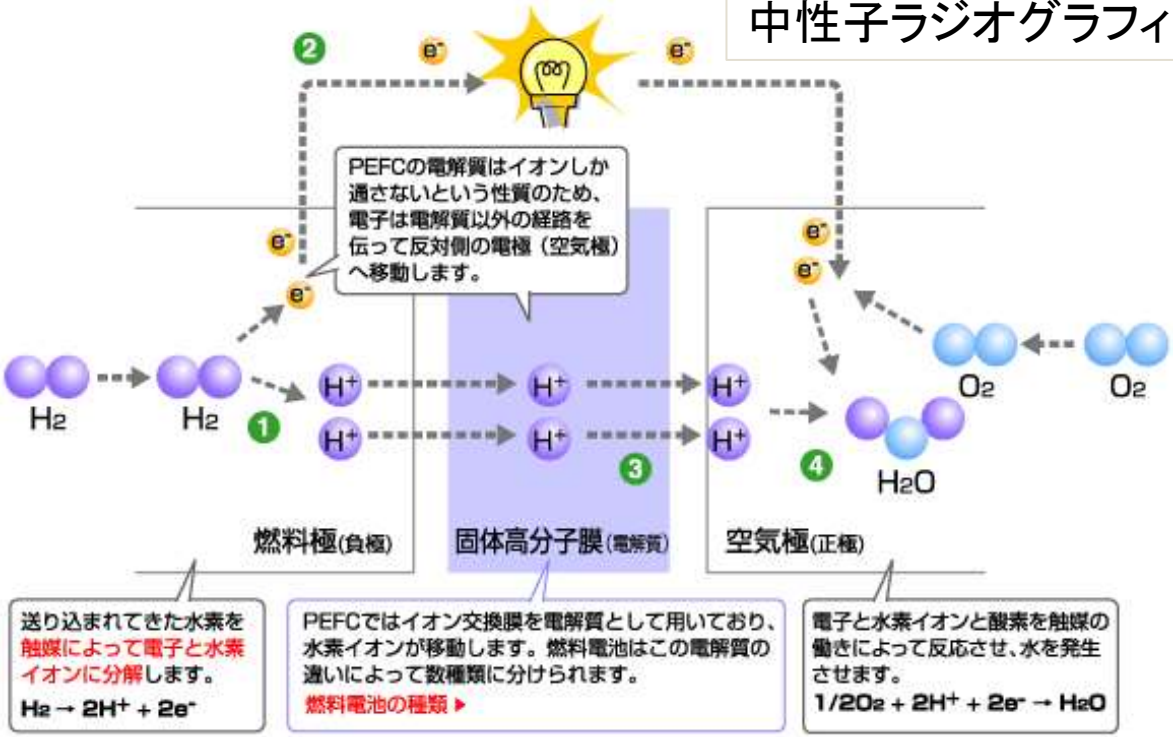


出典　http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2018/siryo09/siryo2.pdf

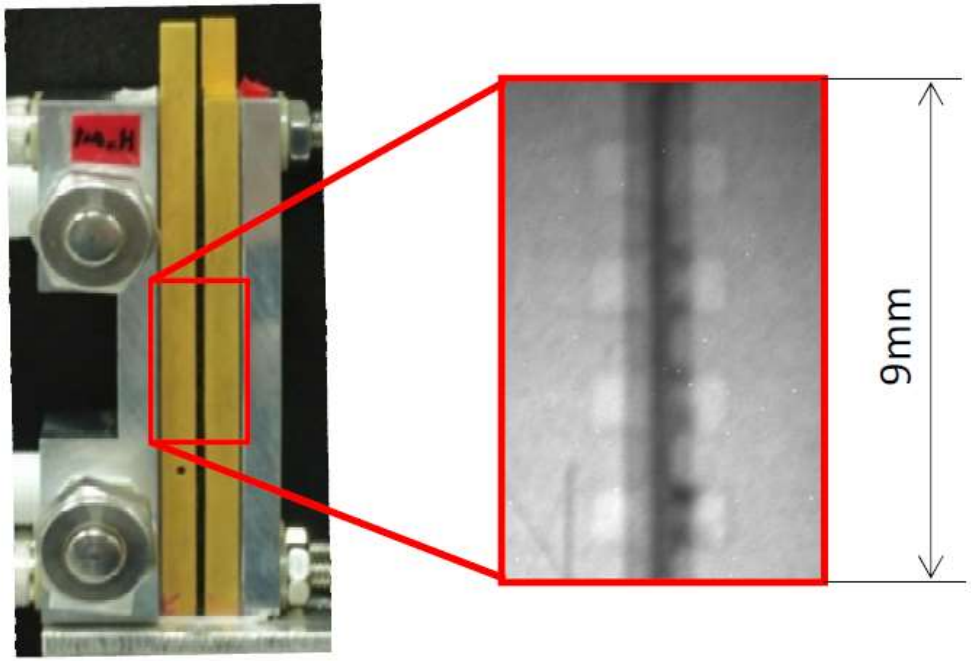
小型固体高分子形燃料電池内の水分測定

（神戸大・浅野他）

中性子ラジオグラフィ



空気極側に発生する水分挙動を観察



固体高分子燃料電池（PEFC)の発電の原理（大阪ガスホームページ https://www.osakagas.co.jp/rd/fuelcell/pefc/pefc/index.htmlより）

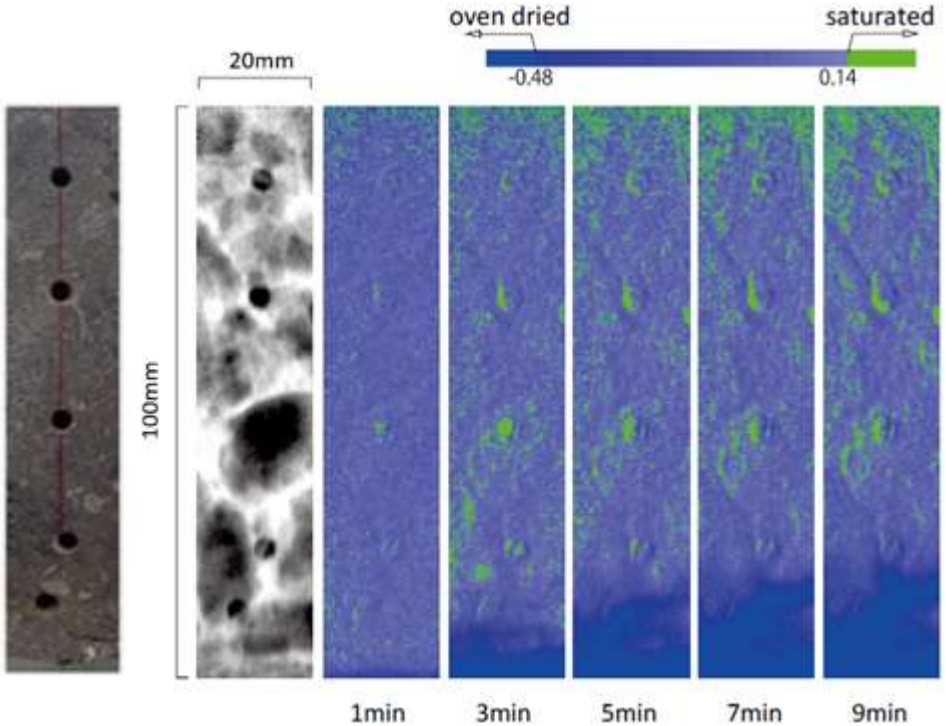
（村川他、中性子イメージングカタログ（中性子施設ハンドブック）、p.I-56）

コンクリートの爆裂

中性子ラジオグラフィ

（東京理科大・兼松他）

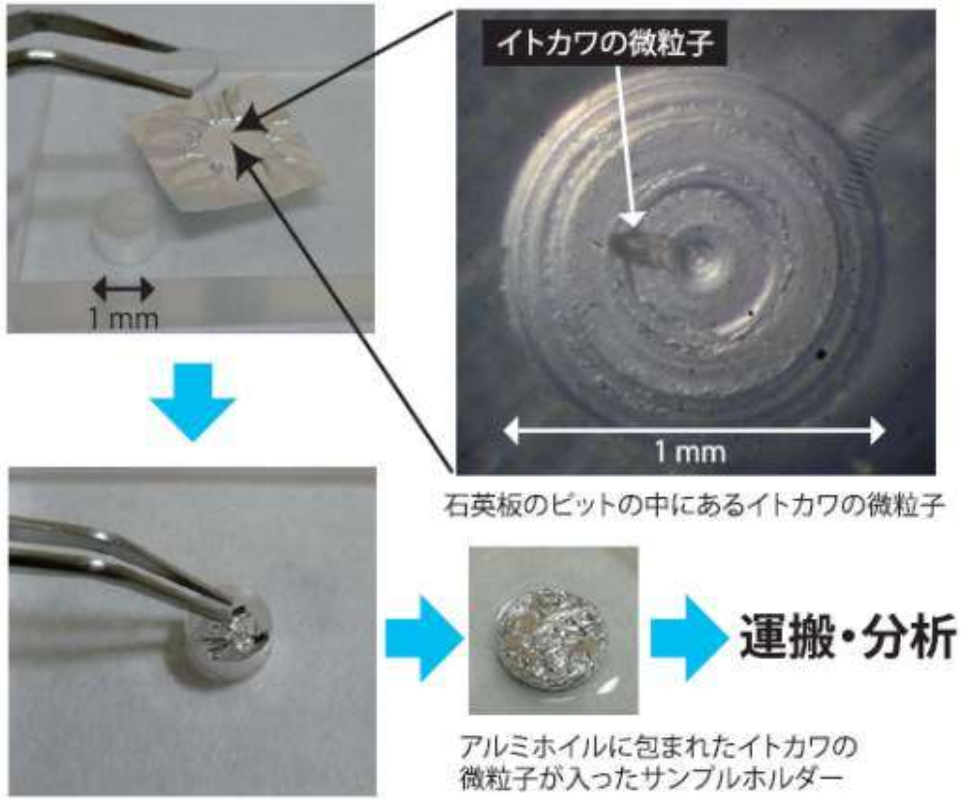
- 火災などの急激な高温加熱によって部材表層部分のコンクリートが飛散・剥離。
- 高層建物に使用される高強度コンクリート（組織が緻密）が爆裂に不利。



高温加熱下におけるコンクリートの中性子イメージング

（兼松他、中性子イメージングカタログ（中性子施設ハンドブック）、p.I-53）

中性子照射による放射化分析



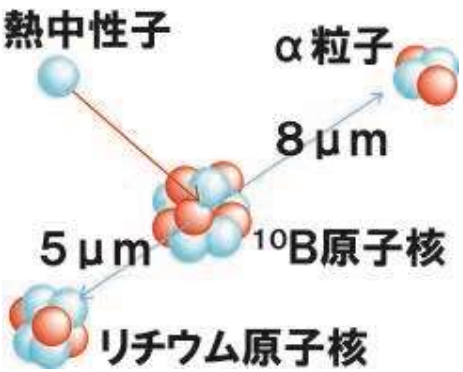
小惑星探査機
「はやぶさ」
（JAXA）

Science (26 Aug.,2011)

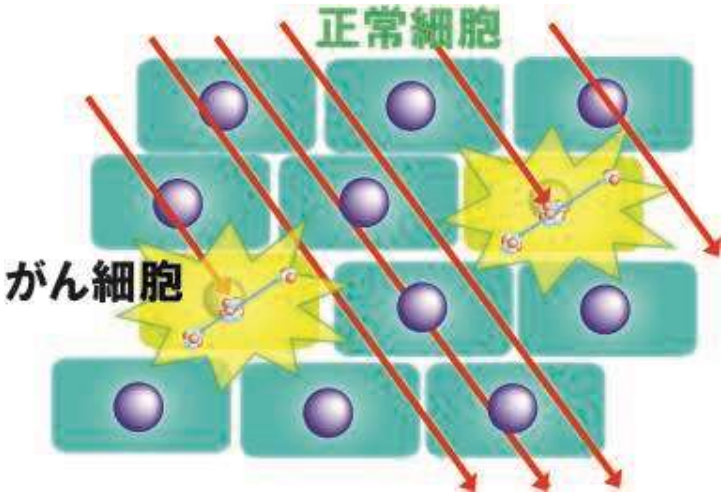
小惑星イトカワの試料（約3マイクログラム）の放射化分析を実施。宇宙由来であることを実証。

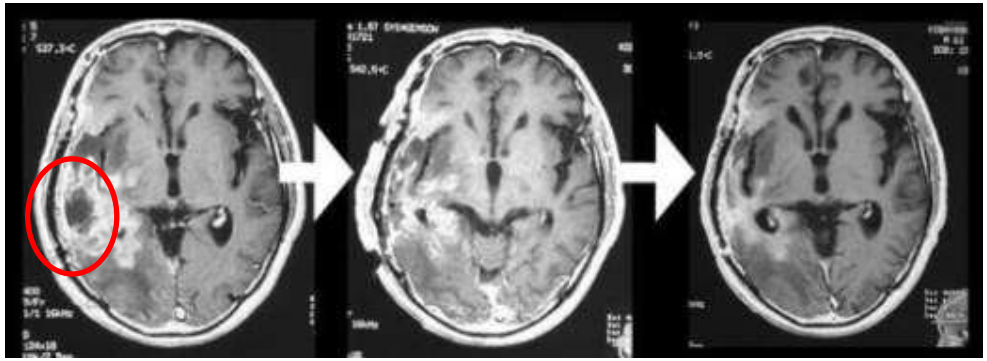
ホウ素中性子捕捉療法の原理

硼素中性子捕捉療法（Boron Neutron Capture Therapy：BNCT）は硼素化合物を取り込ませたがん細胞に熱中性子線を照射し、中性子捕獲反応により生じた高LETのα粒子、リチウム原子核によりがん細胞を破壊する治療方法である



中性子捕獲反応により生じるα粒子、リチウム原子核はともに飛程が10μm以下（細胞1個の大きさ以下）で、硼素化合物が取り込まれた**細胞1個を選択的に破壊**することが可能である

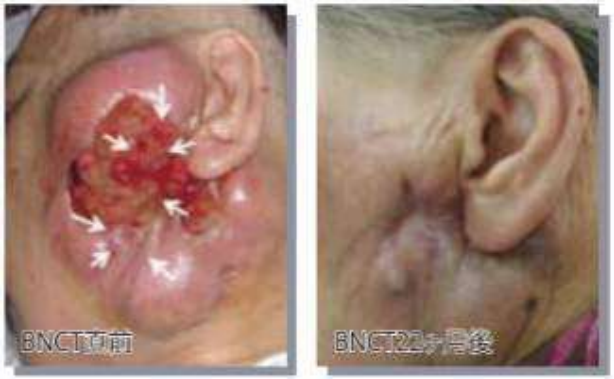




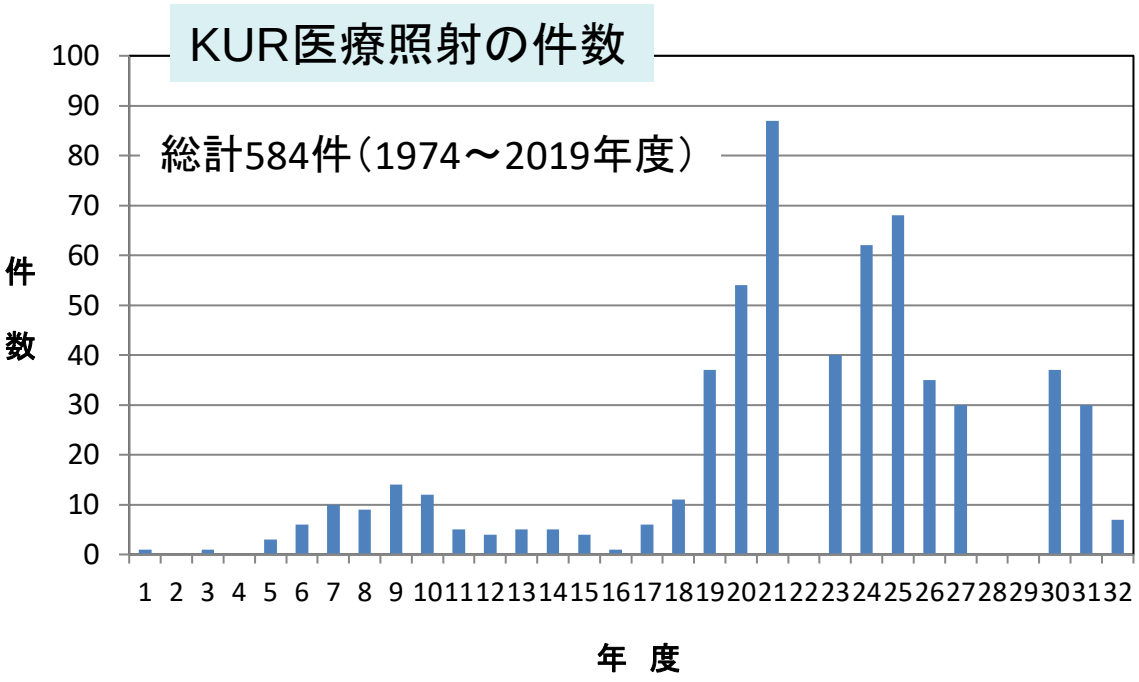
照射前　48時間後　5週間後

ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)

1. ホウ素を含有した薬剤を標的細胞（癌細胞）に注入.
2. 熱中性子を照射.
3. ホウ素が熱中性子を捕獲し、α粒子とLi粒子に分裂.
4. これらの粒子が、標的細胞を破壊.



出典　http://www.jsnct.jp/about_nct/deep.html



加速器によるBNCT治療

サイクロトロン加速器ベース熱外中性子発生装置。2012年に治験開始。（世界初の加速器を用いたBNCT照射装置）

出典　https://www.kyoto-u.ac.jp/sites/default/files/embed/jaresearchresearch_results2019documents200325_301.pdf

サイクロトロンベース熱外中性子源

イノベーションリサーチラボ（医療棟）に設置

住友重機械工業社
サイクロトロン型式：HM30

加速粒子:**水素負イオン**(-H)

加速エネルギー:30MeV

陽子電流: 1mA

出力: 30kW

2020年3月に薬事承認取得

京大複合研における人への照射は終了

2020年6月保険診療開始（頭頸部癌）
（大阪医科薬科大学、南東北病院）

出典　https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/wp-content/uploads/gaibuhyouka_202003.pdf

京都大学臨界集合体実験装置：KUCA
(Kyoto University Critical Assembly)

軽水減速炉心

固体減速炉心

出典　https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/facilities/ca

主な利用内容（研究デーマ）

- 炉物理関係研究（未臨界度測定、ADS実験、Th炉開発）
- 検出器開発
- その他：廃炉技術開発
- 教育（全国の大学の学生など）

福島原子力発電所事故対応として
「デブリ取り出し時の臨界防止用
検出システム開発」(IRID)を実施

サイエンスZERO(H30.9.16.放映)

炉物理実験教育

実験の目的

原子炉を用いた基礎的な炉物理実験・放射線計測実験、および原子炉運転実習を行うことにより、原子炉の原理・核特性・安全性・法的規制等を理解する。

実施対象学生と実施計画

対象学生：京大学部学生、全国大学院生

受入人数：京大20名、全国大学院生150名　実施頻度：年に7回程度

（全国大学院生実験とは別に韓国と中国の学生が参加する英語による同じ実験を行っており、そこに参加する大学院生も募る）

- 月曜日：登録手続き、保安教育（テストを含む）、金線準備

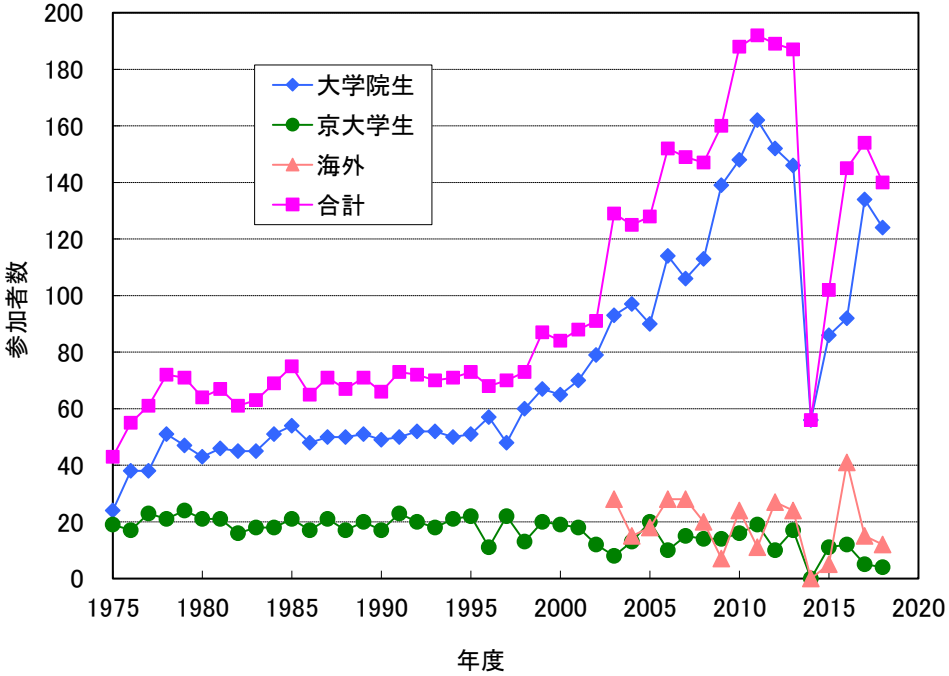
- 火曜日：臨界近接実験、金線・金箔の照射

- 水曜日：制御棒校正実験、中性子束分布測定（放射化量測定）

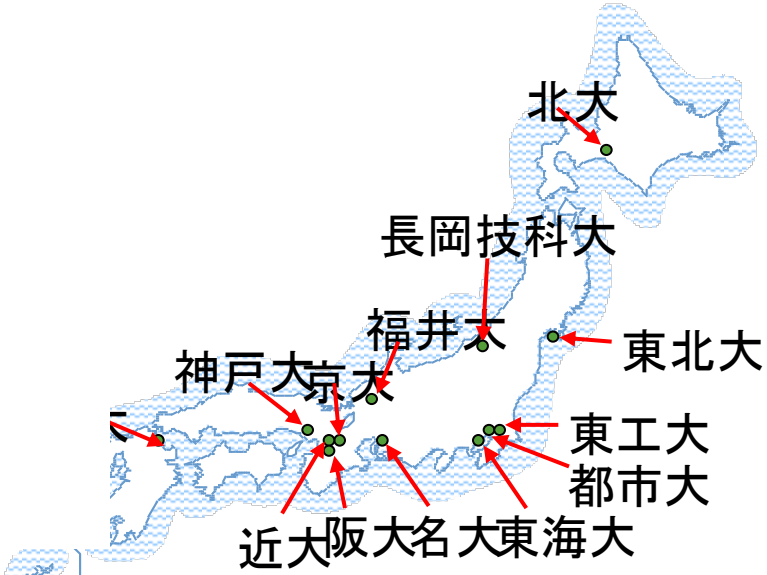
- 木曜日：運転実習、討論会

KUCAを用いた実験教育

1974年　臨界集合体（KUCA）初臨界
1975年　KUCAを用いた大学院生実験を開始
2003年　海外の学生向け実験を開始
2010年　参加者総数　3000名到達
2021年　参加者総数　4530名



臨界集合体を用いた実験の年当たりの受講学生数



福井県敦賀市

「もんじゅ」サイトに設置する新試験研究炉について

第1回コンソーシアム委員会資料（2021.3.23）より

これまでの国の動き

平成28年12月

○「もんじゅ」の取扱いに関する政府方針を決定
・将来的に「もんじゅサイトに新たな試験研究炉を設置し、我が国の今後の原子力研究や人材育成を支える基盤となる中核的拠点となるよう位置付ける」ことが示される

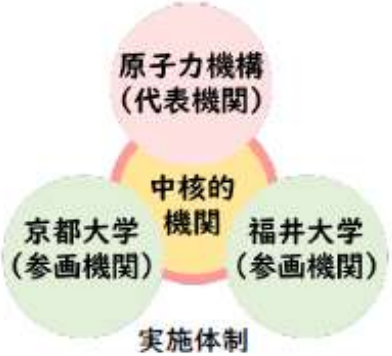
○文部科学省における炉型の絞り込み
・2017年度より設置すべき炉型等の概念設計に向けた調査を実施し、検討の結果、
①西日本における原子力の研究開発・人材育成の中核的拠点としてふさわしい機能の実現
②地元振興への貢献
の観点から中性子ビーム利用を主目的とした「中出力炉（出力1万kw未満）」に絞り込み
・2020年度より概念設計に着手し、2022年度中に詳細設計を開始

令和2年9月

○文部科学省による公募
・委託事業「もんじゅサイトに設置する新たな試験研究炉の概念設計及び運営の在り方検討」を公募

令和2年11月

○原子力機構・京都大学・福井大学を、委託事業の中核的機関として採択
原子力機構：「試験研究炉の設計・設置・運転」
京 都 大 学：「試験研究炉の幅広い利用」
福 井 大 学：「試験研究炉に係る地元関係機関との連携構築」
の検討

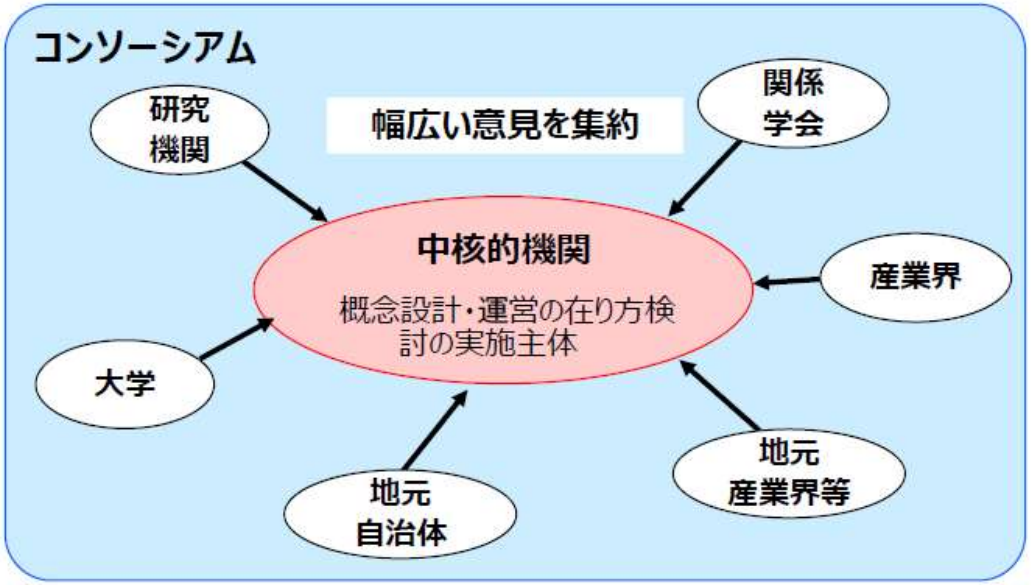


https://www.jaea.go.jp/04/nrr/jp/meeting/index.html

原子力機構が受託した概念設計事業（2020～2022年度）に参加し、試験研究炉の利用の在り方を検討中 → 2023年度より詳細設計を開始

もんじゅサイト試験研究炉検討の体制

中核的機関(原子力機構、京都大学、福井大学)に加えて、本試験研究炉の利用ニーズを有する学術界、産業界、地元関係機関等からなるコンソーシアムを構築し、幅広い意見を反映しながら概念設計及び運営の在り方検討を実施



※中核的機関の役割と体制

原子力機構：「試験研究炉の設計・設置・運転」

- 試験研究炉の設計やもんじゅサイトの知見を活かし、主に概念設計と地質調査を担当
- 体制：理事長直下の組織として新試験研究炉準備室を設置

京都大学：「幅広い利用ニーズ集約とサービス提供」

- 利用ニーズの整理、及びKURの利用運営経験を活かした利用運営の在り方検討を担当
- 体制：KURの利用運転の実績を活かす、複合原子力科学研究所全所的な対応体制として、京大新型研究炉開発・利用センター(KNRR)を設置

福井大学：「地元の大学、研究機関、企業等との連携構築」

- 地元産業界との橋渡し活動、地元関係機関との連携構築に向けた制度の検討を担当
- 体制：学長を長とするタスクフォースのもとに、産学官連携本部も加わる体制を構築

文部科学省 原子力科学技術委員会 原子力研究開発・基盤・人材作業部会（2022.03.16）資料より

もんじゅサイト試験研究炉のスケジュール（見通し）

R2年度～R4年度
概念設計
地盤調査を含む※1

R4年度中～
詳細設計
許認可含む※2

建設工事、検査など
許認可、基礎工事、施設建設工事、
地盤改良・基礎工事などを含む※3

運転開始

※1 予備的調査(1年目)
本格調査(2年目、3年目)

※2 設置許可取得及び建設のための
設工認取得に向けた詳細設計

※3 設工認を段階的に取得しつつ建設着手
建設後、運転開始に向けた使用前検査を実施

文科省委託事業の期間

項目	R2年度	R3年度	R4年度	R5年度～
1. 概念設計		炉心の検討 →	設備・施設レイアウトの検討 →	
2. 地質調査	予備的調査 →	本格調査 →		詳細設計（R4年度中に開始）
3. 運営の在り方検討	利用ニーズ整理、人材育成・利用運営・地元との連携構築のための仕組みの検討 →			

文部科学省 原子力科学技術委員会 原子力研究開発・基盤・人材作業部会（2022.03.16）資料より

京大研究炉の課題等

大学法人化以降の人員・予算の低減、施設高経年化、規制負担の増加

- KUCA
  燃料の低濃縮化実施（濃縮度20%未満）
  【核セキュリティサミットにおける日米合意】
  - HEUの撤去（米国へ引き渡し）、LEUの入手（製造、搬入）
  - 上記にかかる設置変更等各種手続きが必要

第4回核セキュリティサミット（2016年@ワシントン）において、京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)の高濃縮燃料の米国返送及び燃料低濃縮化に関して、日米で合意された。

- KUR
  使用済燃料：2026年5月米国引取り期限
  この期限を超えて運転した場合に発生する使用済燃料の取扱いが未定
  → 2026年5月を超えた運転は、困難な状況
  （なお、運転長期化の場合には、計測制御系統の大幅な更新が必要）

規制強化、施設の高経年化、運営費・人員削減等により、将来にわたる研究炉（KUR）の維持が困難な状況

KUR,KUCAの今後について（2022年3月）

- KURについて、米国の使用済燃料引取にかかる使用期限（2026年5月）以降の運転を行わないことを京都大学として決定し、公表した。（2022年4月5日記者会見）京都大学ホームページ 「京都大学における研究用原子炉（KUR）等の今後の在り方について」 https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news/2022-04-05-0
- ポストKURの共同利用研究については、複合原子力科学研究所における代替中性子源を適切な時期までに整備し、これまで実施してきた中性子利用に関する研究・教育の継承を目指す。さらに日本原子力研究開発機構のJRR-3等、学外の中性子源の利用も進める。
- また、既存のホットラボラトリ等の施設の再整備により、核燃料及び放射性同位体元素を用いた新たな複合原子力科学研究の展開を進める。
- KUCAについては、炉心変更が容易で、かつ、様々な炉心を構成できる世界的にも貴重な実験装置であることから、核セキュリティ・サミットにおける日米共同声明に従い、全ての高濃縮ウランの米国への引き渡しを完了させるとともに、低濃縮ウラン燃料を用いた炉心への転換を行い、今後も実験研究、学生等の人材育成等を実施していく。
- 新試験研究炉の設計に関しては、KURの経験を活かし、利用者にとって利用しやすい環境整備、最先端の研究が実施できる場の構築を目指す。

研究炉の今後に向けて（課題等）

- 今後の研究開発基盤となる施設の整備が必要
  原子力利用を進める上では、照射炉が必要、当面は海外炉の利用
  医療用RI製造への要求、原発利用の動きへの対応が必要
  新たに設置が決まっているのは「もんじゅ」サイトの中出力ビーム炉のみであり、
  JMTR後継炉は見通し不透明
- JRR-3の再稼働（高出力ビーム炉）
  改造から30年以上経過、後継炉の議論が必要
  「もんじゅ」サイト炉の位置付け（JRR-3の代替は困難）
- 放射性廃棄物（研究施設等廃棄物）や使用済燃料の取扱いが不透明
  地元への説明責任、国による取り組みが必要
- 海外炉の利用・ネットワークの構築
  例えば、アジア圏で研究炉ネットワークを構築し、相互利用する
- 臨界装置の今後
  KUCAやSTACYのような臨界実験装置は基礎研究、人材育成に必要、現状の2基体制で十分か（近大炉も人材育成等に寄与）
  また、高速炉系の実験は不要か
- 研究炉にかかる経費負担の検討
  大学での維持管理は困難な状況、産業利用や安全研究（規制対応）もあり、関係省庁や産業界による負担の検討が必要（具体的な設置計画が必要か）

参考：日本学術会議「研究と産業に不可欠な中性子の供給と研究用原子炉の在り方」
（2018年8月）