



2023年12月26-27日 令和5年度中性子イメージング専門研究会プログラム  
京都大学複合原子力科学研究所

# 「もんじゅ」サイト新試験研究炉の現状と 中性子イメージングへの期待

日野 正裕

京都大学複合原子力科学研究所



# 本日のアウトライン

- **新試験研究炉概念設計と京大複合研KNRR**
- **新試験研究炉詳細設計の現状**
- **中性子イメージンググループへの期待  
(KNRRが考える利用設備設計の基本方針案)**

文部科学省の科学技術試験研究委託事業「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」の成果の一部を含んでいます。

第1回コンソーシアム委員会:<https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2021/032301/s01.pdf>

第2回コンソーシアム委員会:<https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2021/102201/s01.pdf>

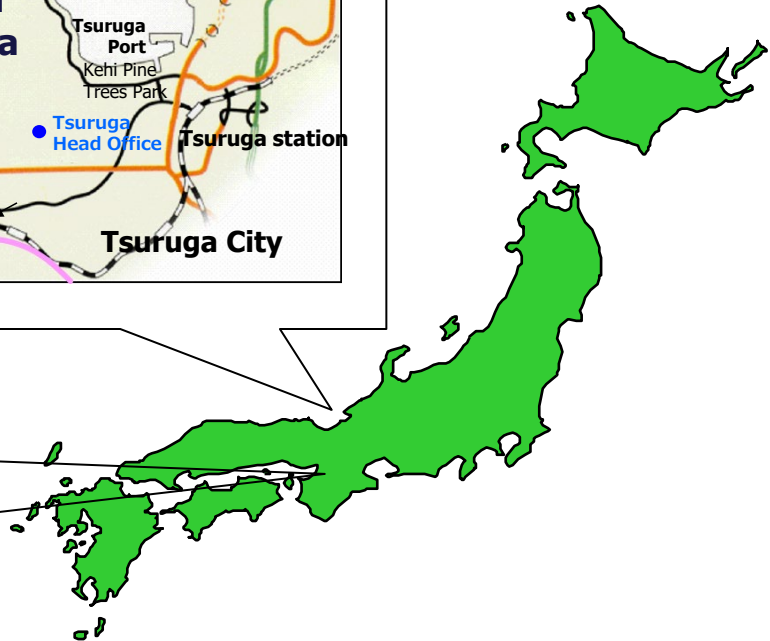
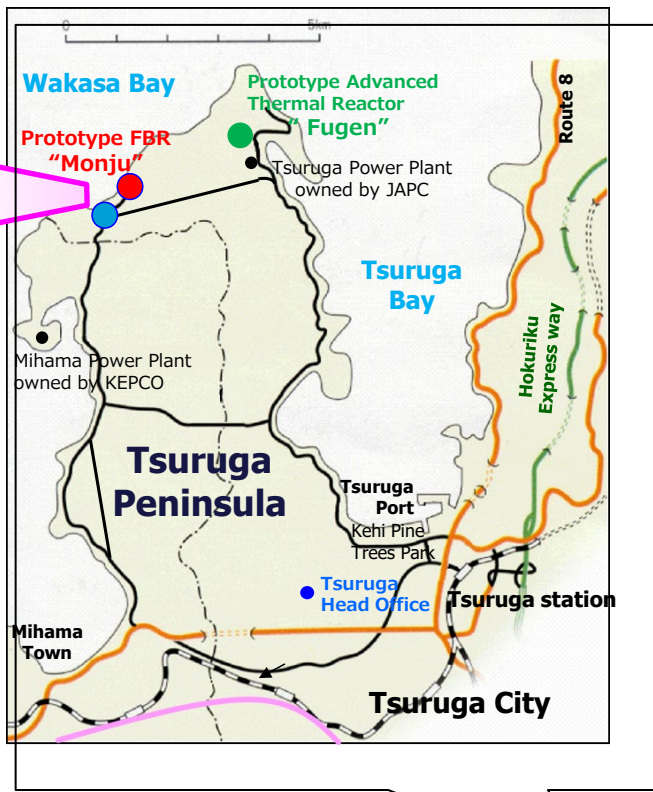
第3回コンソーシアム委員会:<https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2022/032401/s01.pdf>

第4回コンソーシアム委員会:<https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2022/111501/s01.pdf>

第5回コンソーシアム委員会:<https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2023/032401/s01.pdf>

第1回コンソーシアム会合:<https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2023/112001/s01.pdf>

# 福井県敦賀市「もんじゅ」サイト新試験研究炉



# 新試験研究炉概念設計検討活動の成果@JAEA


原子炉の出力と利用目的：熱出力10MW級の中性子ビーム炉（R2/9文部科学省提出）

➤ **5つの性能目標を設定**

- ①安全性 ②安定性
- ③経済性 ④利便性
- ⑤将来性

➤ **基本仕様を策定**

- ・燃料要素と配置
- ・冷却材
- ・減速材



ce20炉心 燃料要素

性能目標を設定  
基本仕様を策定

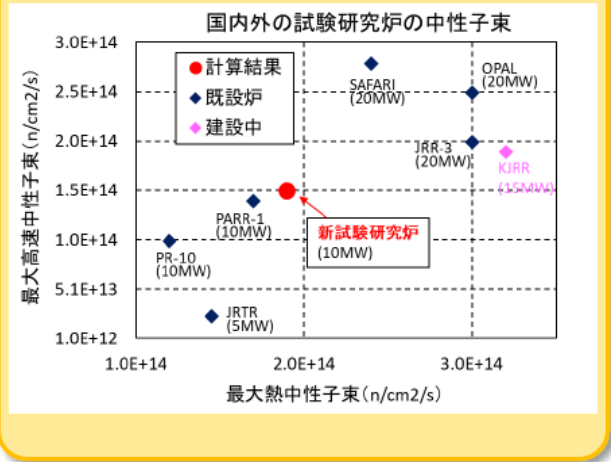
原子炉の性能を検討

原子炉の成立性を検討  
制御手法を検討

原子炉施設の基本諸元

➤ **原子炉の性能を検討**

- ・原子炉の基本的構成をもとに、運転期間や原子炉内の中性子の分布等の性能の検証を実施
- ・**中出力炉（10MW未満）では最大熱中性子束は世界最高レベル**の性能

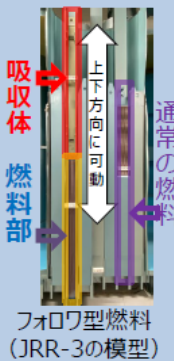


➤ **原子炉の成立性を検討**

- ・発熱の除去の視点から解析し、炉の成立性を確認
- ・今後、システムの視点から成立性を検討

➤ **制御手法を検討**

- ・炉の制御手法として、2種類検討  
(フォロー型燃料/平板型)
- ・今後、工学的成立性踏まえ選定



吸収体 上下方向に可動 通常の燃料 燃料部

フォロー型燃料 (JRR-3の模型)

➤ **地質調査等**

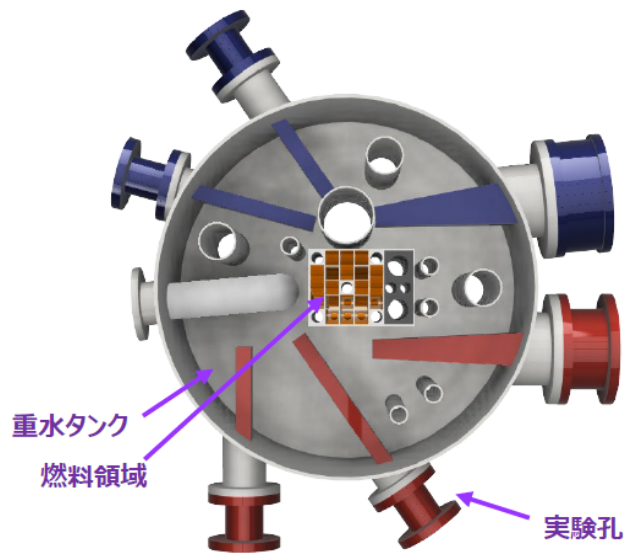
- ・もんじゅサイト内の候補地点の地質調査を行い、原子炉設置の妨げとなる要因の有無や土地の性状等を調査
- ・土石流/地すべりリスク・対策コスト評価



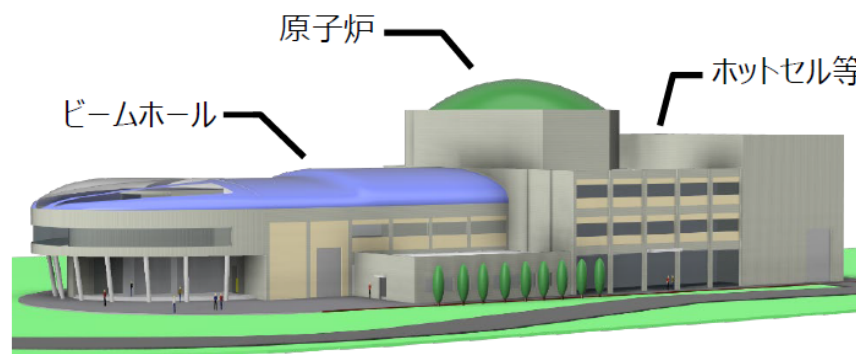
# 新試験研究炉概念設計の基本性能@JAEA

## 10MW級の研究炉では世界トップレベルの性能を有する見込み

項目	仕様
炉型式	軽水減速軽水冷却重水反射体付スィミングプール型
熱出力	10 MW未満
最大熱中性子束	約 $1.5 \times 10^{14}$ n/cm <sup>2</sup> /sec (重水領域)
炉心形状	角形形状
格子数	25
寸法	約40cm×約40cm×約75cm (燃料領域)
燃料要素	20体 (フォロワ燃料要素を含む)
照射筒	5体
減速材	軽水
冷却材	軽水
冷却方式	強制循環 (運転中)、停止中 (自然循環)
反射材	重水
制御棒	4体 (フォロワ型) または6体 (板状型)
吸収体材質	ハフニウム、ホウ素など
形状	フォロワ型または板状型
生体遮へい体	プール内軽水、重コンクリート、普通コンクリート
ビーム利用	中性子ラジオグラフィ、中性子散乱実験、中性子即発γ線分析、小角散乱実験など
照射利用	放射化分析、RI製造など



炉心部のイメージ



新試験研究炉の完成イメージ

# 「幅広い利用運営WG」(WG2@京大) 活動方針

- 中性子ビーム利用を主目的として性能を最大限引き出した中出力炉において、**持続可能性が期待できる幅広い利用運営のあり方(研究者を中心に広く人が集まる魅力的な施設のあり方)**を検討する
- 中性子ビーム利用を主目的としつつも、多目的利用を旨とする研究炉において、**特長を出すことに注意し、汎用性・先端性・多様性とバランス良く実験装置群を検討し、運営体制案(指針)構築につなげる**

幅広い利用運営を担当する京大(複合研)では、長期的視野で継続的に対応するためにも、新型研究炉開発・利用センター(KNRR)を設置し、活動しています。

# より良い利用を目指し利用設備を検討

新試験研究炉は多岐にわたる革新的研究成果やイノベーション創出が期待でき、「国際公共財」として世界に誇れる施設を目指すことが重要。10MWの性能を最大限に活かすビーム利用設備としてはまず冷中性子源(CNS)が挙げられる

新研究炉が拓く未来

本質を究明する基礎研究に基づく革新的イノベーション創成  
次世代日本・世界を創る人材育成

新材料開発イノベーション

高機能高分子  
高性能磁石  
半導体開発 など



医薬品（治療薬・診断薬）開発



物質の機能発現の本質に迫る  
(中性子散乱・微量元素分析・  
陽電子消滅分光)

放射性同位元素(RI)  
生産・利用

タンパク質の機能解明から生命の本質に迫る  
(中性子散乱)

粒子線がもたらす  
物質・生命構造の改変  
(中性子照射)

新規がん治療  
(BNCT)高度化



原子力安全

ゼロカーボン社会の実現

リチウム電池開発  
燃料電池開発  
インフラ長寿命化  
熱交換器高性能化 など



マイクロからマクロまで  
多階層構造の特質究明  
(中性子散乱・中性子イメージング)

中性子・RI利用

研究炉



物質の静的・動的構造解析や元素分析等をより高感度かつ精密に行うためには、熱中性子ビームだけではなく冷中性子ビームの利用が非常に重要

# 代表的な実験装置(優先5装置)と産業利用への寄与

## 中性子小角散乱装置 SANS

試料に入射した中性子ビームが散乱する角度と強度の関係から、原子や分子の集合構造のサイズ・形状を解析する実験装置

高分子・ゲル・新素材、電池、エネルギー材料  
タンパク質・核酸・薬剤開発  
金属・鉄鋼、金属工業



## 中性子回折装置 ND

試料によって散乱された中性子ビームの回折パターンから結晶構造等を解析するための実験装置

金属・セラミックス・ガラス・  
金属工業、素材産業  
構造材料・部材・  
プラント、自動車産業  
電極材・素子・  
電池、エネルギー材料  
磁性材料



## NI 中性子イメージング装置

入射した中性子ビームの透過率の違いにより、機械や配管、植物などの内部の構造や現象を可視化するための実験装置

機械・自動車産業、宇宙航空産業  
熱流動・原子力産業  
植物・農業  
素子・合金・電池、エネルギー材料



## NAA

### 中性子放射化分析装置

中性子の照射によって放射化された元素の出す放射線のエネルギーをもとに非破壊で微量元素分析を行うための実験装置

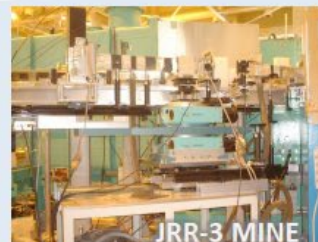


半導体・電子産業  
コンクリート・土木、建設  
重金属・不純物・化学・繊維産業  
資源、環境

## NR 中性子反射率計

斜めに入射した中性子ビームが反射したときの角度と強度の関係から、試料表面や界面の密度や粗さを解析するための実験装置

接着・界面活性・  
素材産業、化学産業  
摺動・潤滑・  
機械工業、自動車産業  
多層膜・  
磁性材料、センサー





# 必要な装置検討(照射利用)

まず①放射化分析を最優先で設置

10MW研究炉の性能を最大限活かすため、②—⑤の装置も重要

- ①放射化分析: 非破壊で(貴重な試料の高確度な)微量元素分析
- ②RI製造: 特に $^{99}\text{Mo}$ 製造や $^{177}\text{Lu}$ 等の医学利用RI製造(開発含む)
- ③材料照射: 精密温度制御等自由度の高い高速中性子照射場
- ④陽電子ビーム: 原子空孔(欠陥)探索等(ビーム利用との相乗効果)
- ⑤生物照射: BNCT基礎研究を中心に生物的照射効果基礎研究

照射場だけではなく、ホットラボラトリ(ホットラボ)や分析装置等の付帯設備が必須。今後ビーム利用、照射利用間で建設を念頭に優先順位をつける必要がある。

医薬利用RI製造は強いニーズがあり、研究炉の特長も活かす。ただし課題もあり、どのレベルまで実現できるのか、詳細な検討を開始中。



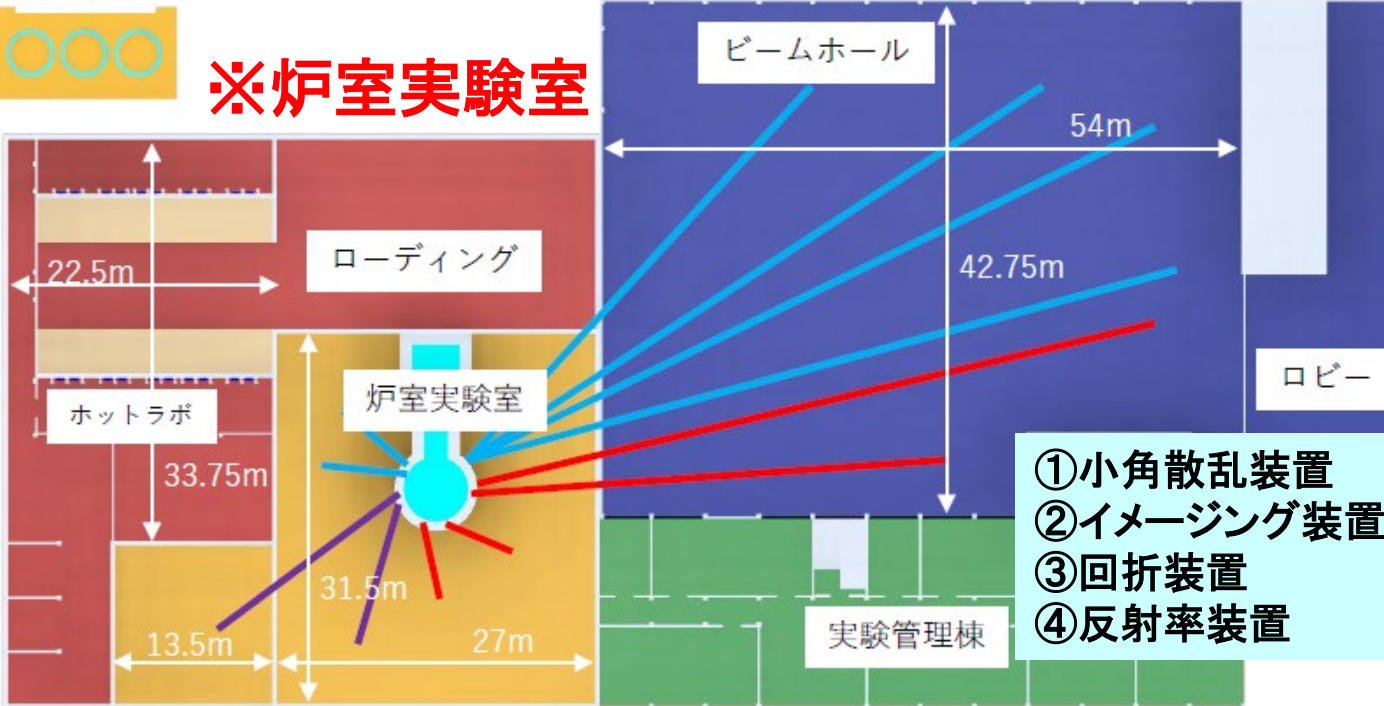
# たたき台として検討している実験装置スペース

冷却塔

## ※ビームホール

## ※炉室実験室

施設側が準備する装置だけではなく、意欲のある研究者や企業が自らの資金で独自の装置を開発・設置し、それを継続的に利用するためのビームラインや実験スペースを事前に確保しておくこと重要



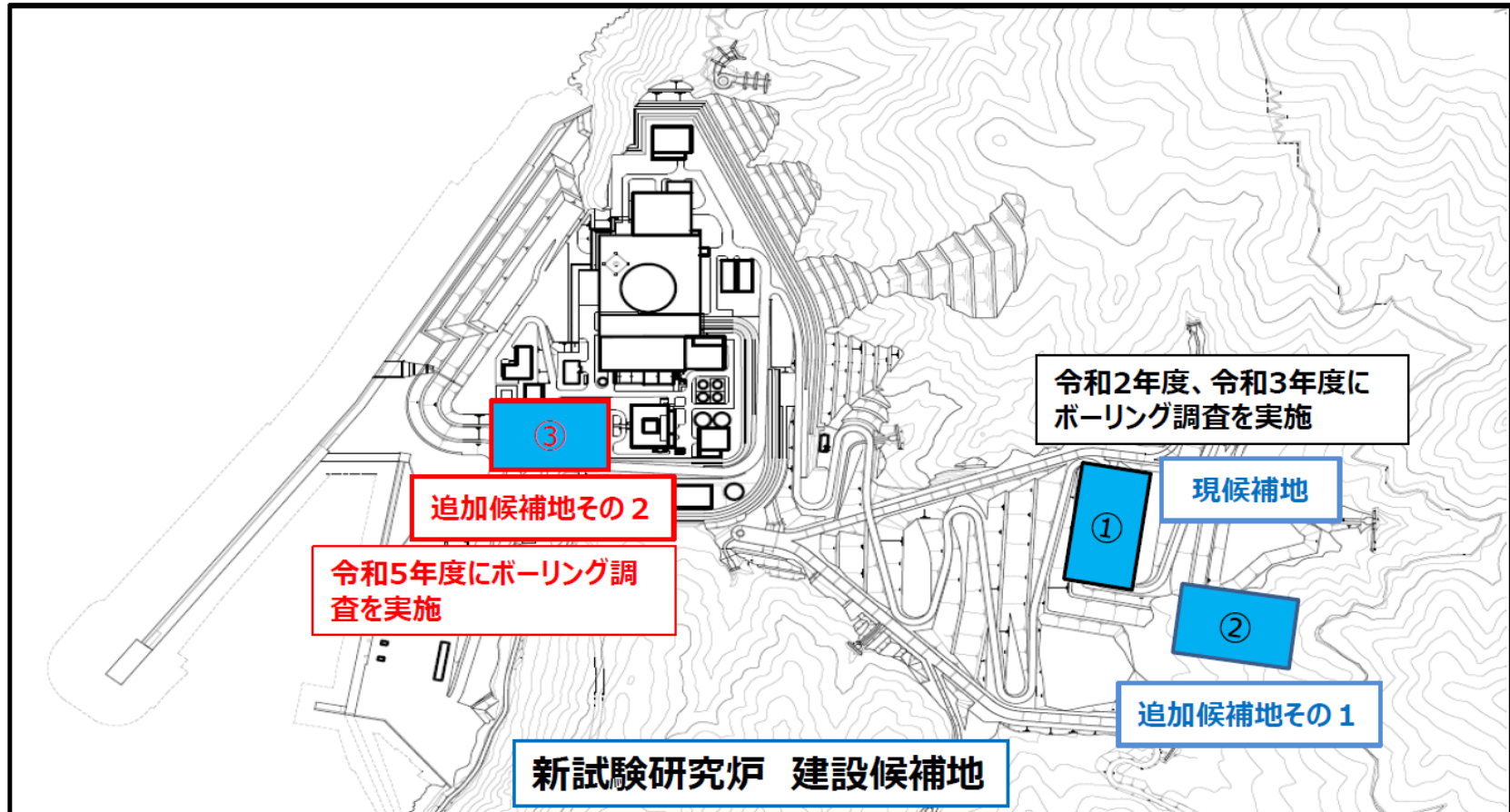
- ①小角散乱装置
- ②イメージング装置
- ③回折装置
- ④反射率装置

優先4装置について、学術のみならず産業利用、試料環境等に利用に特徴を出すこと等を念頭に複数台持つ形を基本とし、10MW研究炉の性能を活かすために、**まずビーム利用:4+11=15(照射利用:5)合計20台の装置を想定。**

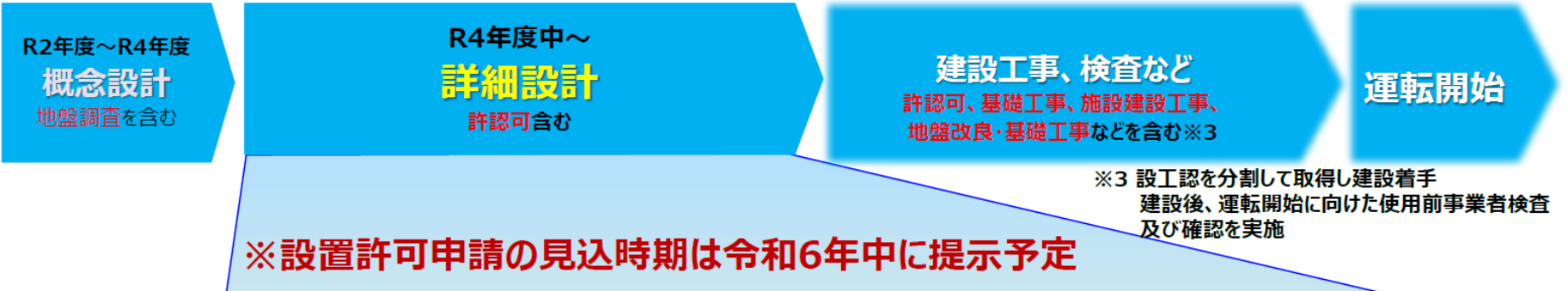
即発ガンマ線分析装置、偏極中性子小角散乱装置、極小角中性子散乱装置  
大強度熱中性子イメージング装置、熱中性子回折装置(残留応力測定、単結晶用4軸解析)  
偏極中性子反射率装置、大強度熱・冷中性子利用三軸分光装置、TOF型冷中性子非弾性散乱装置  
中性子制御検出技術高度化のための開発試験装置〃、詳細と優先順位を決める必要有

# 令和5年度における地質調査

No.	位置	名称	特徴	必要な対策
①	現候補地	地点A	山側盛土部（炉の設置場所は資材置場）	盛土斜面の安定性対策、液状化対策、土石流対策、建屋背後斜面補強対策、
②	追加候補地その1	地点A'	山側盛土部（炉の設置場所は尾根）	
③	追加候補地その2	地点B	もんじゅ近傍（炉の設置場所はもんじゅ建屋近傍）	土石流対策、地下埋設物対策、敷地の拡幅



# 詳細設計検討スケジュール



項目	詳細設計 I	詳細設計 II
許認可 手続		設置許可申請 △ → 審査 → △ 設置許可取得 設工認申請 (分割申請) → 審査 → △ 設工認取得
設置許可申請 のための設計	設置場所に関する状況の調査 (気象、地盤、地震等) 施設重要度分類、設備、機器の基本仕様策定 ハザード (リスク源) の特定、防護対策	
設工認取得の ための設計 (分割申請)		本体設備、冷却系設備、計測制御系設備、廃棄設備、放射 線管理設備、使用済燃料保管設備、利用設備、ユーティリティ 設備等に関する詳細設計 一般構造設計、耐震設計、耐津波設計等
管理棟・ 敷地造成工事 (設工認対象外)		

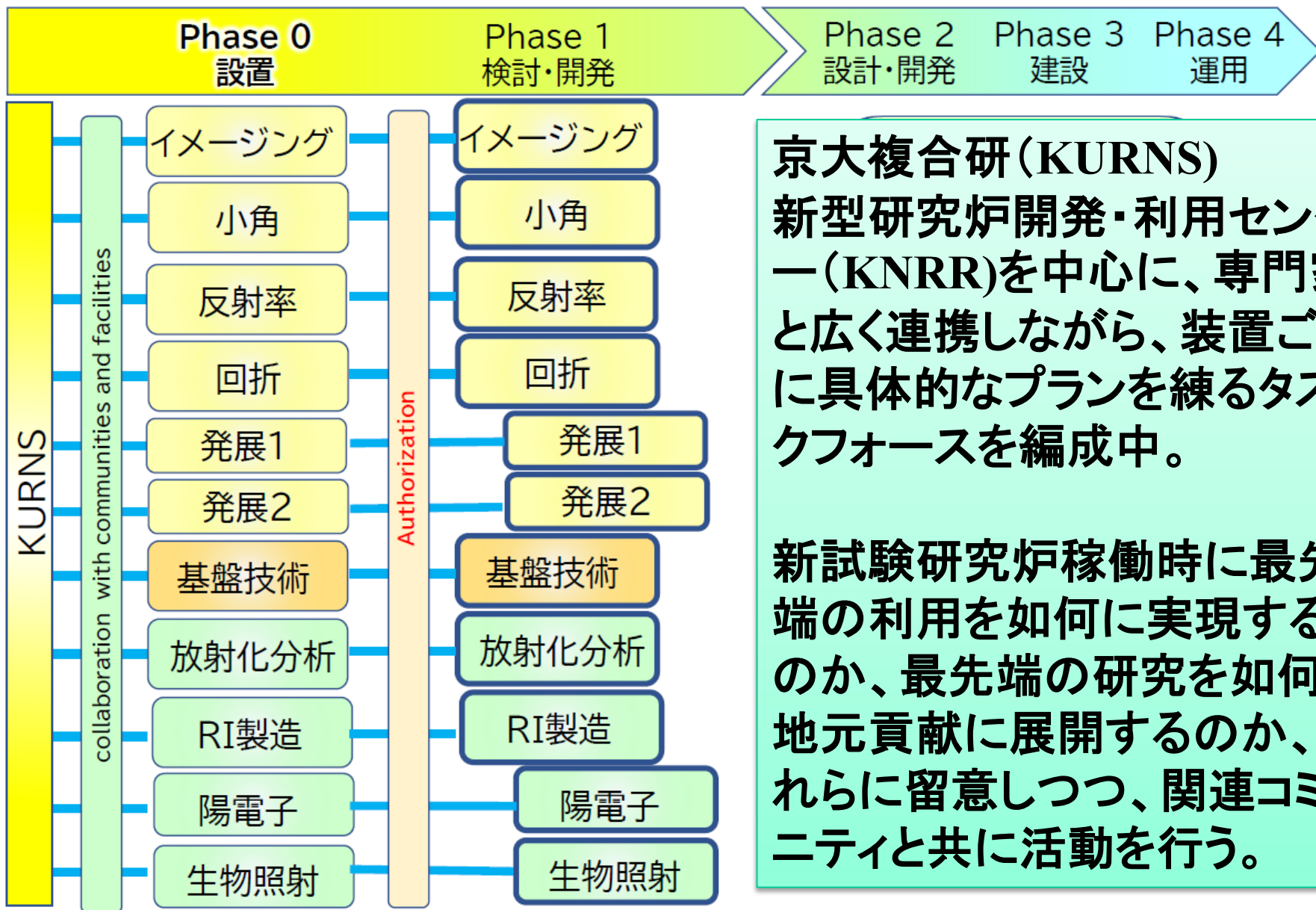
設工認を取得  
できたものから  
製作・工事着手

(参考) 旧規制基準下において設置許可申請から建設終了までに、HTTR (高温工学試験研究炉) では約 8 年、STACY (定常臨界実験装置) では約 7 年を要している。

設工認：設計及び工事の計画の認可



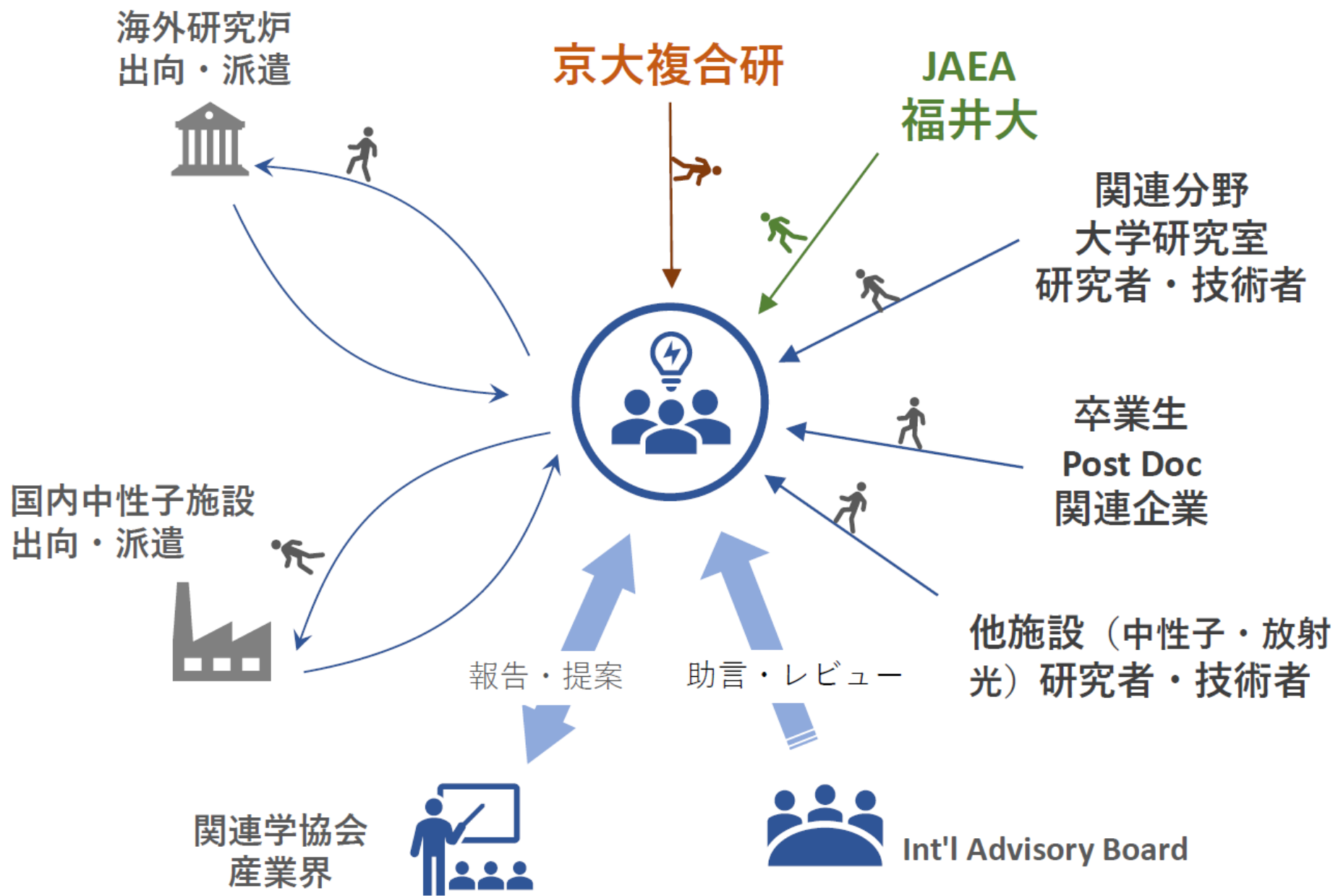
# 実験装置設計に向けて(タスフォース編成)



京大複合研(KURNS) 新型研究炉開発・利用センター(KNRR)を中心に、専門家と広く連携しながら、装置ごとに具体的なプランを練るタスクフォースを編成中。

新試験研究炉稼働時に最先端の利用を如何に実現するのか、最先端の研究を如何に地元貢献に展開するのか、これらに留意しつつ、関連コミュニティと共に活動を行う。

# タスクフォース構成：関連コミュニティと共に発展



# 実験装置設計におけるKNRR基本方針案

JAEA新試験研究炉推進室設計グループとKNRRが協議し、原子炉設置許可申請に向けた詳細設計検討を行っている

利用設備の基本仕様は、KNRRが性能に関する観点から取りまとめを行い、JAEAが機械設計の観点から検討を行う。検討結果については、安全性、製作性、原子炉本体への影響、利用設備配置などを考慮し、原子炉メーカーとも協議の上、最終的なテクニカルジャッジを新試験研究炉推進室が行う。

利用設備は基本方針案(例えば、下記は中性子ビーム利用から抜粋)を確認し、

- 冷中性子源(CNS)の設置が最優先
- 中性子ビームラインとしては導管実験室のラインが最優先
- 中性子導管のラインは、熱中性子導管及び冷中性子導管の双方を整備
- 中性子実験装置は、最適化した中性子光学系を整備
- 自由な実験環境及び実験者アクセス性確保(DX、少なくともリモート計測必須)
- 実験スペースは、コンソーシアム委員会を出してきたサイズでまず検討……

設置許可申請に必要な案件(水平実験孔の本数、サイズ等)のたたき台案を照射利用とのバランスもとって検討中

新試験研究炉稼働時に最先端の利用を如何に実現するのか、最先端の研究を如何に地元貢献に展開するのか、長期的視点にたった装置開発を通じて、関連コミュニティと共に発展し、より高いレベルでこれらの課題解決を目指すことが重要。中性子イメージング利用のより広く、かつ独創的な展開に期待しています

# まとめ

- 熱出力10MWで中性子ビーム利用を主目的とした「もんじゅ」サイト新試験研究炉の概要及び詳細設計の現状を紹介
- 利用設備の基本方針案及び実験装置の実現を目指す体制(タスクフォース)等、京都大学複合原子力科学研究所 新型研究炉開発・利用センター(KNRR)の活動を紹介

## 今後の課題&展開

- 新試験研究炉の本格稼働時に最先端の利用を実現するためには、研究炉の特長を活かした、継続的な先端研究・利用開発が重要。
- 10MW研究炉に高性能CNSと広いビームホール、優先5装置と関連先端装置で、研究のコア(例えば中性子利用ならではのバイオやナノテク研究の地域のコア)となり、産業利用展開も目指す等、最先端研究が如何に地元貢献に展開できるかに留意しつつ、関連コミュニティと協力して活動を行う。