



日本原子力学会 新型炉部会
部会・連絡会セッション
「高速炉戦略ロードマップ検討会報告」

(3) 短期的視点からの検討：
技術継承と東電福島第一事故を
踏まえた安全性向上

2018年9月6日

堺 公明(東海大学)



背景と目的

◆ 背景

- 「第5次エネルギー基本計画」(2018年7月)では、「『高速炉開発の方針』に基づき策定されるロードマップの下、米国や仏国等と国際協力を進めつつ、**高速炉等の研究開発に取り組む**」とされており、我が国は今後も技術開発を推進
- **長期的視点**から検討した結果、「**資源の有効利用**」と「**環境負荷低減**」を両立できる高速炉を、必要性が高まる可能性のある**21世紀半ば**には高速炉を**実用化できる技術基盤を整備すべき**
- 東京電力福島第一原子力発電所事故、電力自由化の進展および2016年末の「**もんじゅ**」**廃止措置**決定といった情勢の大きな変化を踏まえる

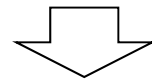
◆ 目的

- **短期的視点**からの検討として、現在の**情勢を考慮して**向こう20年から30年間の**取り組みで考慮すべき事項**の観点について検討する



短期的視点からの検討

向こう20年から30年間に取り組みで考慮すべき
事項の観点

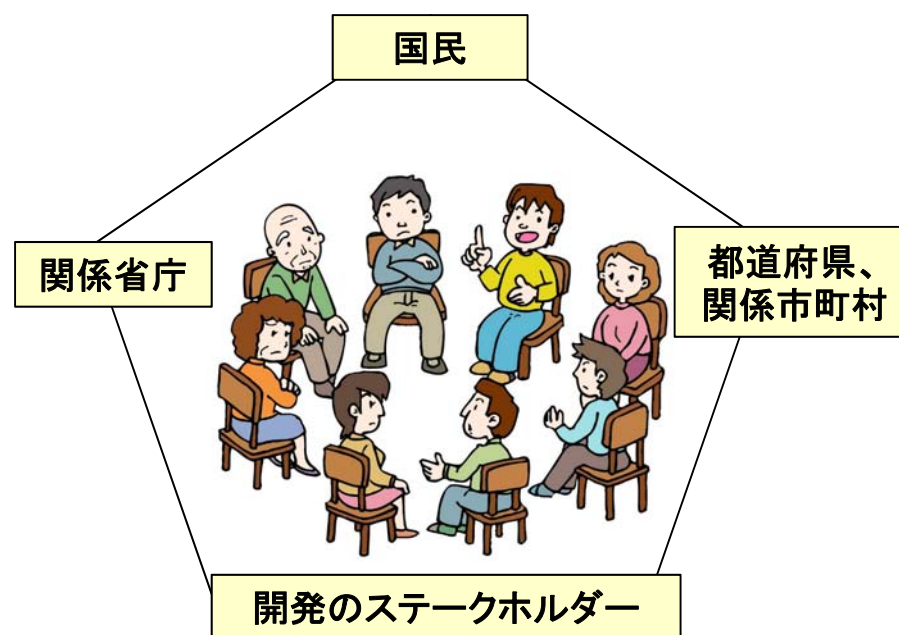


- ◆ 社会的合意形成に向けた取り組み
- ◆ 安全性の向上(リスク低減)
- ◆ 不確実性への備え
- ◆ 国内資産の活用
- ◆ 国際協力
- ◆ 技術継承



社会的合意形成に向けた取組み

- 高速炉開発の方針(※)
 - 今後の我が国の高速炉開発は、世界最高レベルの技術基盤の維持・発展を図りつつ、高い安全性と経済性を同時に達成する高速炉を開発し、将来的な実用化を図り、もって国際標準化に向けたリーダーシップを最大限に発揮することを目標 (※原子力関係閣僚会議,「高速炉開発の方針」(2016年12月決定))
- 開発のステークホルダーをはじめ、規制機関を含む政府の関係省庁、都道府県、関係市町村、国民の各層において本決定が十分に浸透し、**理解を得た状態で開発を推進**することが重要
- 特に、高速炉開発は、向こう50年から100年程度の長期的な取組みが必要となることから、**エネルギー安全保障上の重要性、確保すべき安全性の目標、得られる便益及びコスト等の視点を長期間にわたって共有**できるように、社会的な合意形成に取り組むとともに、その維持に努めることが重要





安全性の向上(リスク低減)

- 東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓として、より過酷な自然災害への対策及びシビアアクシデント(SA)対策の徹底が図られた。
- 同事故を経験した我が国は世界の高速炉安全に貢献する責務がある。
- 第4世代炉国際フォーラム(GIF)では、高速炉開発国の政府間協力として、SFRに対する国際的な安全設計要件である安全設計クライテリア(SDC)と安全設計ガイドライン(SDG)を我が国が主導して構築を進めている。

東電福島第1事故の教訓反映

安全目標
基本的安全アプローチ

第4世代炉共通の安全原則

例:緊急時退避の必要性を回避
例:DiD第4レベル対応・受動的特性活用

第4世代SFRの安全設計クライテリア(SDC)

高温構造 受動安全 他

安全原則を要件化

第4世代SFRの安全設計ガイドライン(SDG)

炉心反応度関連対策
崩壊熱除去関連対策

安全設計クライテリアを解説

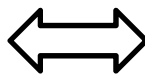
炉心系 冷却材系 格納系
燃料など Na水反応対策 Na火災対策

各国の規格・基準類



安全性の向上(リスク低減)

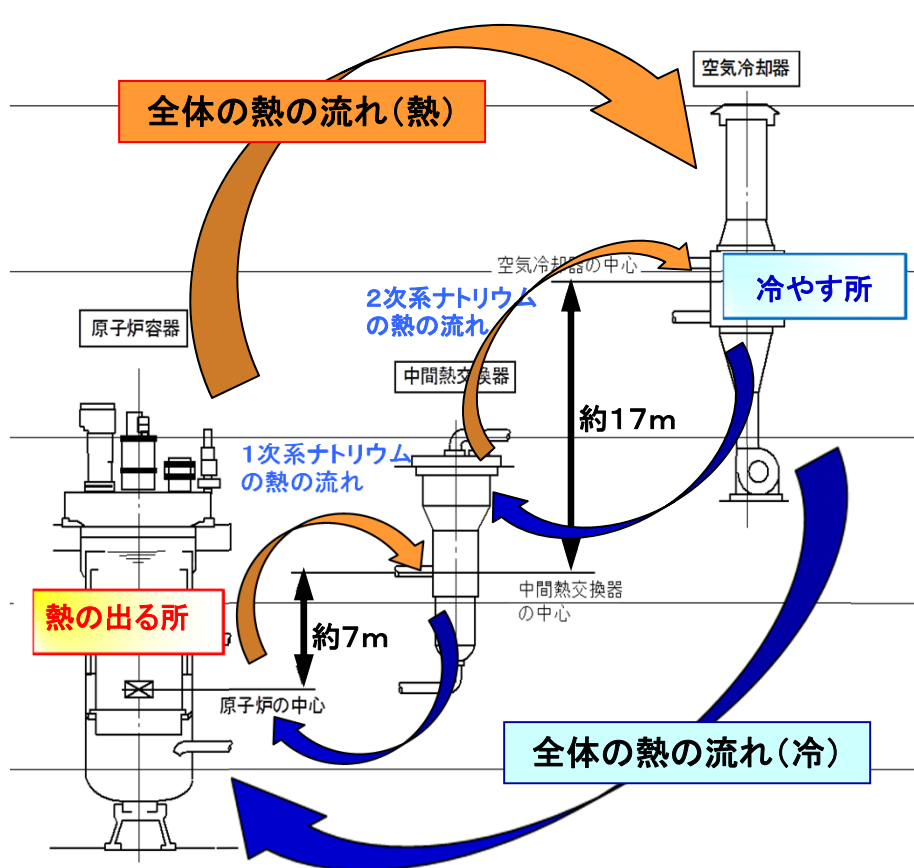
軽水炉
除熱には交流電源が必要



高速炉
除熱には交流電源がなくてもいい
直流電源のみで可能(手動操作も可能)

東京電力福島第一原子力発電所事故

全交流電源喪失を想定しても自然循環により冷却できる



「もんじゅ」空気冷却器

万が一、非常用ディーゼル発電機が起動せず、循環ポンプや送風機などに電源が供給されず運転ができなくなっても、温度差によって自然に起きる“対流”現象(=自然循環)と、熱を良く伝えるナトリウムの性質を活かし、高速炉ではポンプを使わずに炉心の冷却ができるように設計している。

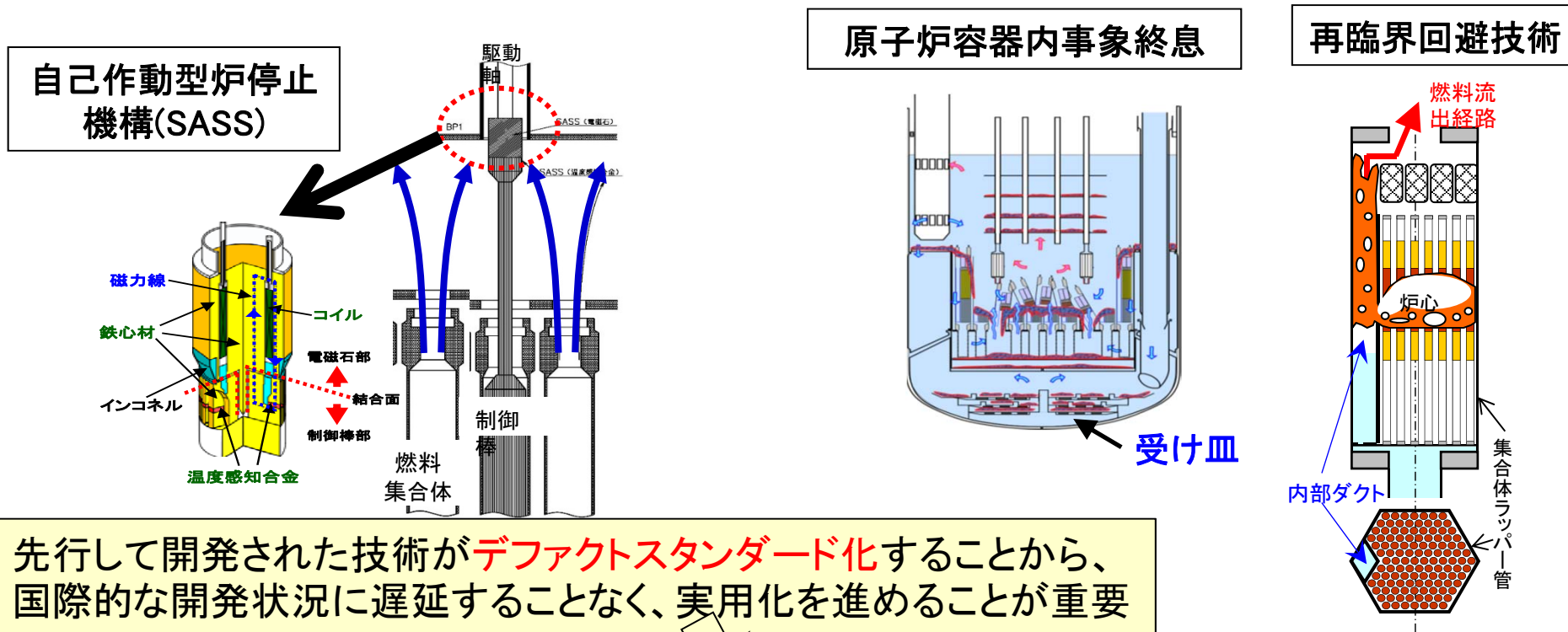


高速炉の安全性を実証



安全性の向上(リスク低減)

- 重大事故に対する安全性向上技術開発
 - 自然災害を起因とする事象を含めて炉心損傷を受動的に(物理現象を利用して)防止できる機構
 - 仮に大規模な炉心損傷に至った場合にも、その影響を原子炉容器内で終息
 - 最終障壁である格納容器内に放射性物質を閉じ込め
 - 周辺公衆の避難を不要とできるほど安全性を高めるための技術開発が重要

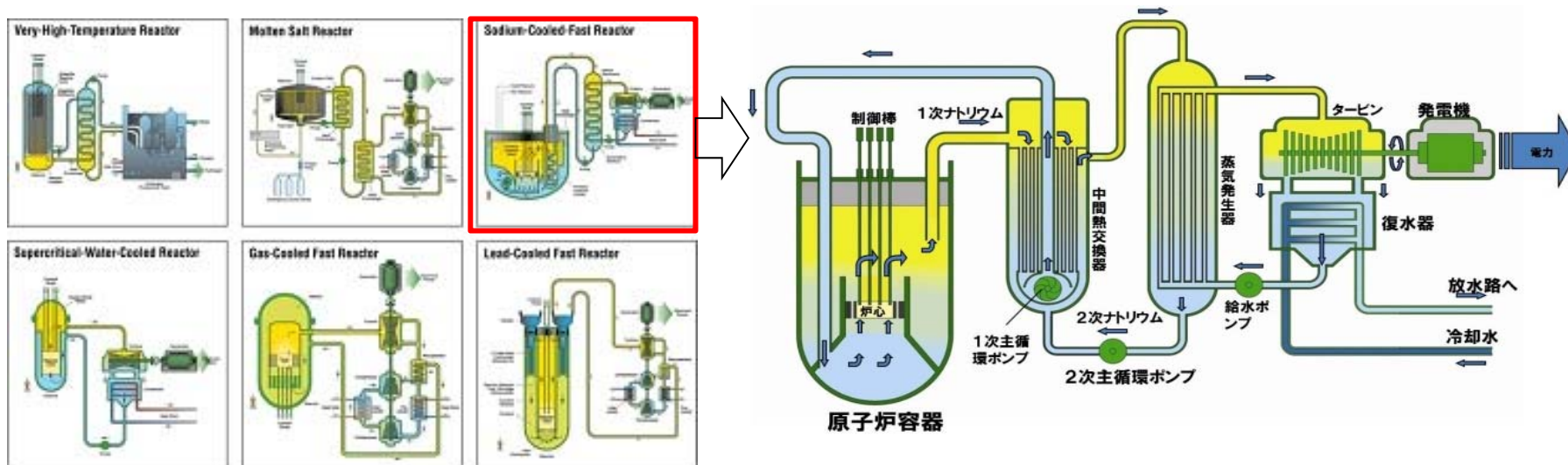


安全性向上技術の実証と国際標準化



不確実性への備え

- エネルギー安全保障と環境負荷低減のいずれがどの程度要求されるか不確実性が高いことから、両者に柔軟に対応できる計画とすることが重要である。
- また世界の技術開発の方向や市場の動向と整合できるように、炉型や燃料などに**柔軟性を確保**しておくことが望ましい。
- 現状の世界の高速炉開発に関する趨勢は、ナトリウム冷却と酸化物燃料あるいは金属燃料を組み合わせた**高速炉サイクル**である。



https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_59461/generation-iv-systems



不確実性への備え

- 実用化戦略調査研究(FS)フェーズI(1999～2000年)では、多様な選択肢を幅広く比較・評価(冷却材と燃料形態の組合せ40概念程度)
 - ナトリウム炉、ガス炉、重金属炉、水炉の有望概念を選定
- FSフェーズII(2001～2005年)では、各炉型を設計検討したうえで比較・評価
 - 主概念:ナトリウム冷却MOX燃料炉と副概念:ナトリウム冷却金属燃料炉を選定
- FSフェーズIIに続き、第4世代炉国際フォーラム(GIF)を2000年に立ち上げ、6概念を選定
 - 最も技術成熟度が高いのはナトリウム冷却高速炉
- 我が国で蓄積されている技術は、酸化物燃料とナトリウム冷却炉の技術に厚みがあることから、**ナトリウム冷却高速炉サイクルから優先的に開発していくのが合理的である。**
- 実際に、ナトリウム炉がロシア・中国・インド・フランスで精力的に開発が進められている。

実用化は民間実施が基本であるが、電力自由化と不確実性のため、研究開発段階において民間が主体的に取り組める状況にない。このため、国としての研究開発に関する明確な方針を提示すると共に、民間投資可能な環境が整うまでは研究開発を先導する必要がある。

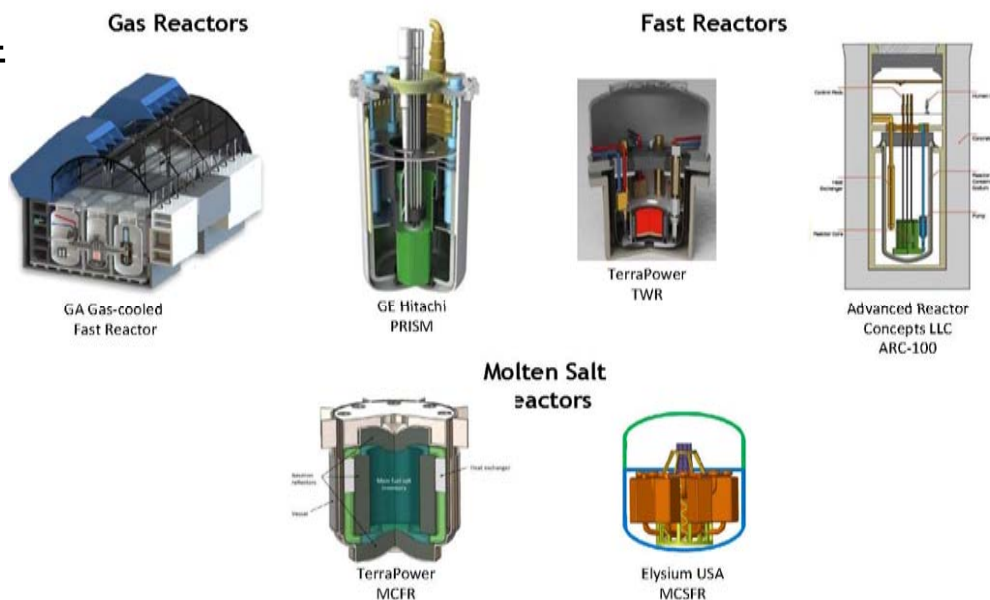
時代に即した官民の新たなパートナーシップが求められる。(私見)



不確実性への備え

長期的検討であり、
今世紀半ばは基盤
整備

- 国際的には、萌芽的なものを含めて、様々な冷却材、燃料形態の**革新的な高速炉概念**の研究開発も行われている。
- これらの研究開発の動向については、常にアンテナを高くし、革新炉における研究開発から酸化物燃料ナトリウム冷却高速炉へ適用できる技術が開発される可能性に常に注意を払っていく必要がある。
- 我が国はナトリウム冷却高速炉等の基幹技術の実用化に向けた技術開発とともに、革新炉技術の多様性確保の両者を達成できる研究開発環境を整備し、自由な発想ができる大学等が中心となって、幅広く多様な概念検討や基礎研究に取り組み、**革新技術の創出と人材の育成**を進めていくことが期待される。



7

http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/fr/senryaku_wg/pdf/008_01_00.pdf



国内資産の活用(もんじゅ)

「もんじゅ」各段階での主な成果





国内資産の活用(もんじゅ)

- 国際的にも貴重な施設である「もんじゅ」は廃止措置に移行するが、**廃止措置期間中**においても燃料取り出し時の**燃料取り扱い技術**知見蓄積や廃止措置過程における点検経験に基づく高速炉**保守管理技術**知見の蓄積や、解体過程において長期間ナトリウムを内包した機器の**経年特性データ**取得・設計検証を行うなど重要な技術成果を取得することができる。
- 地震時のプラント安全性の評価構築に向けた「もんじゅ」の**主要機器**や**構造物**を活用した**耐力限界**の把握、次期炉設計に必要となる**技術開発成果の集約**、運転シミュレータ、ナトリウム取扱い訓練施設等を活用した高速炉技術者の**人材育成**にも活用できる。
- さらに、既存及び今後「もんじゅ」で得られる知見・経験とシミュレーション技術を組み合わせた新たな**設計最適化手法**を開発することにより、「もんじゅ」で期待された**成果に匹敵した知見を得る**ことも期待できる。
- このため、廃止措置期間中においても国際的な視野で「もんじゅ」を**最大限に活用**した技術開発、知見・経験の蓄積を実施するべきである。

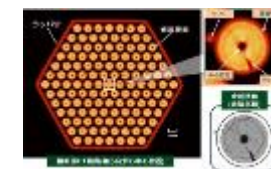
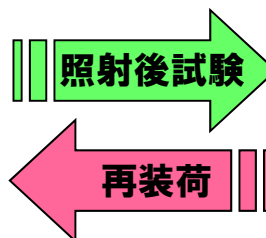


国内資産の活用(常陽)

- 実験炉「常陽」は、現在、**新規制基準**への**適合性審査**に対応しているところである。「常陽」は世界最高レベルの高速中性子束を有しており、多様なニーズに対応可能なように工夫がなされている。
- また、高速炉研究や人材育成のみならず、核融合や非原子力分野からの基礎基盤研究や多目的利用が期待されている。
- さらに、照射後試験施設が近接しており、インフラが充実していることから、研究の発展性に期待できる。このような期待に応えるためにも、「常陽」は**早期に再稼動して最大限活用**していくべき。



関連する
照射後試験
施設群

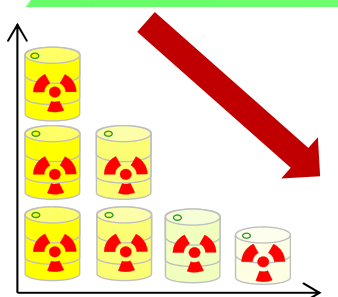




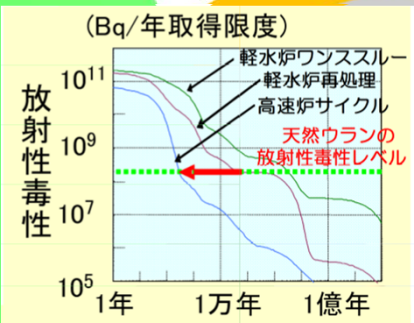
国内資産の活用(常陽)

「常陽」の今後の役割 — 国際協力、基礎基盤研究への貢献 —

■ MA含有MOX燃料の照射試験



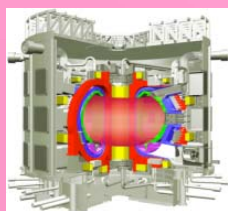
廃棄物の減容



有害度低減

環境負荷低減

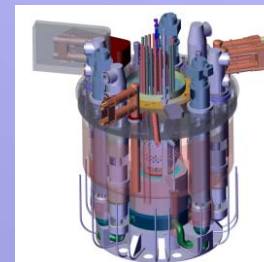
- 大学利用、国際貢献
- 核融合炉開発
- 加速器駆動未臨界炉(ADS)開発



核融合炉

基礎基盤・多目的利用

- 第4世代炉開発
- 多様な燃料・材料照射データの取得



ASTRID協力

高速炉の研究開発

- 大学・高専との連携
- 海外技術者の受け入れ



学生実習



海外研究者のインターンシップ研修

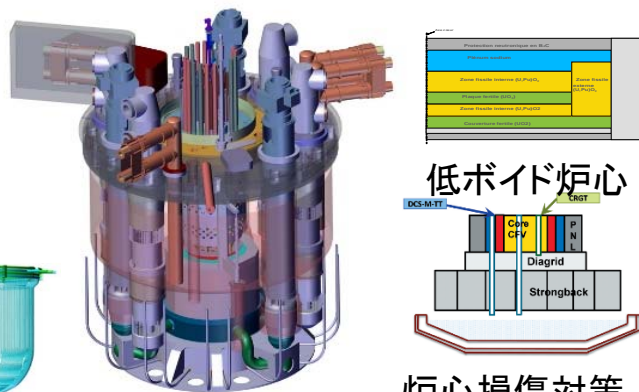
原子力人材育成



国際協力

- フランスとのASTRIDの共同開発や、ロシアの運転経験の習得など、**海外と積極的に知識共有を図るべき**であるが、国際協力にはギブ・アンド・テイクが要求される現実を考えると、国内技術の維持・向上が前提であることを忘れてはならない。また、ASTRID計画の規模縮小など資本主義国におけるプロジェクトはその時代の経済に大きく左右されることから、**過度な海外依存は安定性を損なう**可能性もある。
- したがって、**国内での開発と技術維持が基本**であり、**国際協力**はそれを補うものであり、**有効に活用**しつつも、肩代わりするものではないと認識すべき。

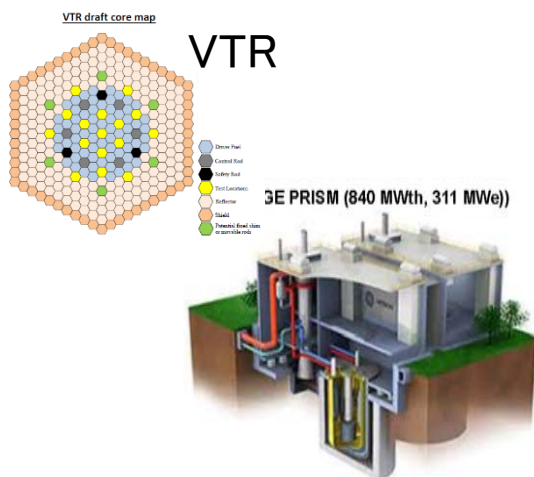
フランス



ASTRID

炉心損傷対策

アメリカ



VTR

3E PRISM (840 MWth, 311 MWe)

ロシア



BN1200

崩壊熱除去系

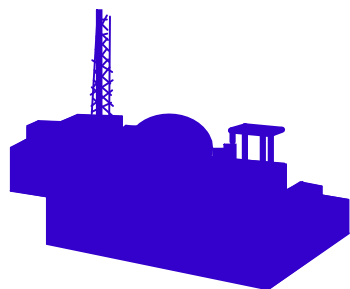
RVACS伝熱構造



技術継承



- 我が国の高速炉開発は原型炉「もんじゅ」の設計・建設から30～40年経過している。このため、「もんじゅ」の設計、建設経験者の引退等もあり、次期炉の設計にその経験を生かしていくため、世代間での技術伝承や人材育成は急務。
- 机上の設計研究と要素技術開発だけでは、高速炉の実用化に必要な機器の開発、プラント建設、運転保守等の能力は十分に伝承・涵養されない。
- 先行炉の経験知があるうちに、次世代を担う若手研究者・技術者と共に我が国の高速炉技術を維持・発展させるべき。
- 今後数十年かけて、安全性を向上させた**プラント設計と技術開発、そして機器・構造物の製造・建設、運転という一連の経験**を積む必要がある。



<http://www.jhson.jp/service/technology.html>



<http://www.hitachi.co.jp/recruit/newgraduate/field-navi/power/nuclear/>

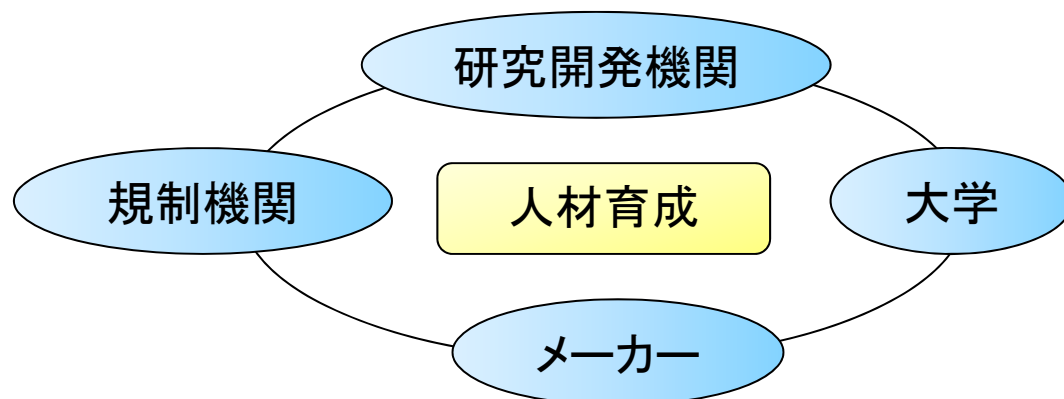


<http://www.hitachi-hgne.co.jp/index.html>



技術継承

- 人材育成の観点からは、原子力エネルギーの役割、その安全な利用のための種々の対策等に関する丁寧な説明に継続的に取り組むとともに、原子力について正しく理解し、社会に対して伝えていくことのできる**人材の育成**が重要
- 高速炉に関する**正確な知識と情報**に基づく教育が**モチベーションを有した人材**の育成につながることから、大学における原子力エネルギー利用に関する**幅広い教育**を強化
- 研究開発機関、規制機関等と大学間の高速炉サイクル技術に関する具体的な**研究連携**を推進し、研究開発人材に関するシームレスな育成を図ることが重要
- 人材をひきつけるためには**具体的な高速炉開発計画**が必要



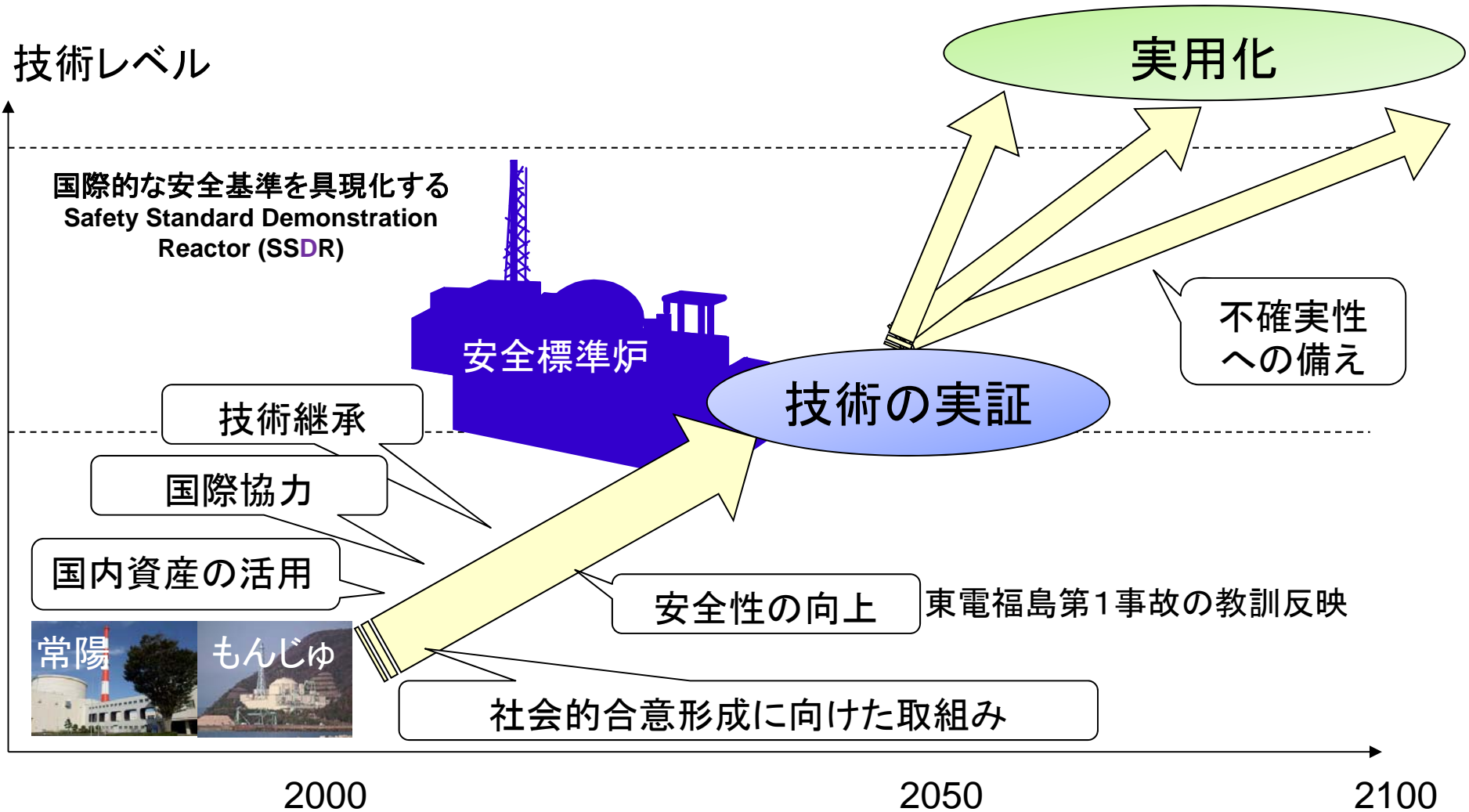


結論

- 高速炉開発は、数十年オーダーの長期的な取組みが必要となることから、**社会的合意形成**に向けた取組みが重要。
- 東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえて世界の高速炉安全に貢献する技術開発を推進していく。**(安全標準炉)**
- 将来の不確実性への備えとして、基幹技術のみならず多様な技術開発にも取り組み、革新技術の創出を推進して、**柔軟性を確保**しておくことが望ましい。
- また、次期炉に役立つ知見を蓄積するため、「もんじゅ」、「常陽」といった**国内資産を有効に活用**すべき。
- 国際協力は有効に活用しながら、**国内での開発と技術維持**を基本的に推進していくべき。
- 先行炉の経験知があるうちに、次世代を担う若手研究者・技術者と共に我が国の**高速炉技術を維持・発展**させるべき。
- このためには、今後数十年かけて、安全性を向上させたプラント設計と技術開発、そして機器・構造物の製造・建設、運転という**一連の経験を積む**必要がある。



21世紀半ばには高速炉を実用化できる 技術基盤を整備





以下は補足

プラントライフサイクルを再現した設計支援システムのイメージ

仮想ライフサイクルシステム (VLS)

プラントライフサイクルの再現
(複合現象/シナリオに対応)

機器要素シミュレーション
(機構論・多次元)

特定現象シミュレーション
(機構論)

大規模解析支援技術
(複数コードの連携)

実験データベース
(核、熱流動、構造、材料)

モデル化情報・V&Vデータ

ナレッジマネジメントシステム (KMS)

基盤データ整備

・実プラントデータに基づく検証済みデータの蓄積

- 「もんじゅ」3Dレーザースキャナーデータ
- 設計図面・設計図書
- 運転・保守データベース
- 廃止措置データベース (プラントデータベース)



・機器試験等による基盤データの蓄積

複合現象検証試験 [敦賀、大洗施設]
(Na燃焼、材料特性、構造材挙動、
系統間試験)

国際協力

- ASTRID協力
- ・設計知見
- ・R&D知見 (評価手法、試験データ)
- ・大型実証試験
- 日米協力 (CNWGなど)
- ・炉心燃料
- ・R&D知見
- ・炉内・炉外試験データ

仮想空間

融合

現実空間

設計支援・応用システム (EAS)

- ・ 実プラントデータを実装し、実体化させた数値プラント(バーチャルリアリティ技術の適用)

AM評価

PRA

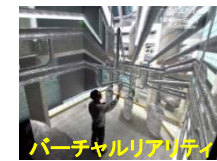
セキュリティ評価

保守・保全評価

デコミ最適化

運転員訓練

設計最適化



バーチャルリアリティ

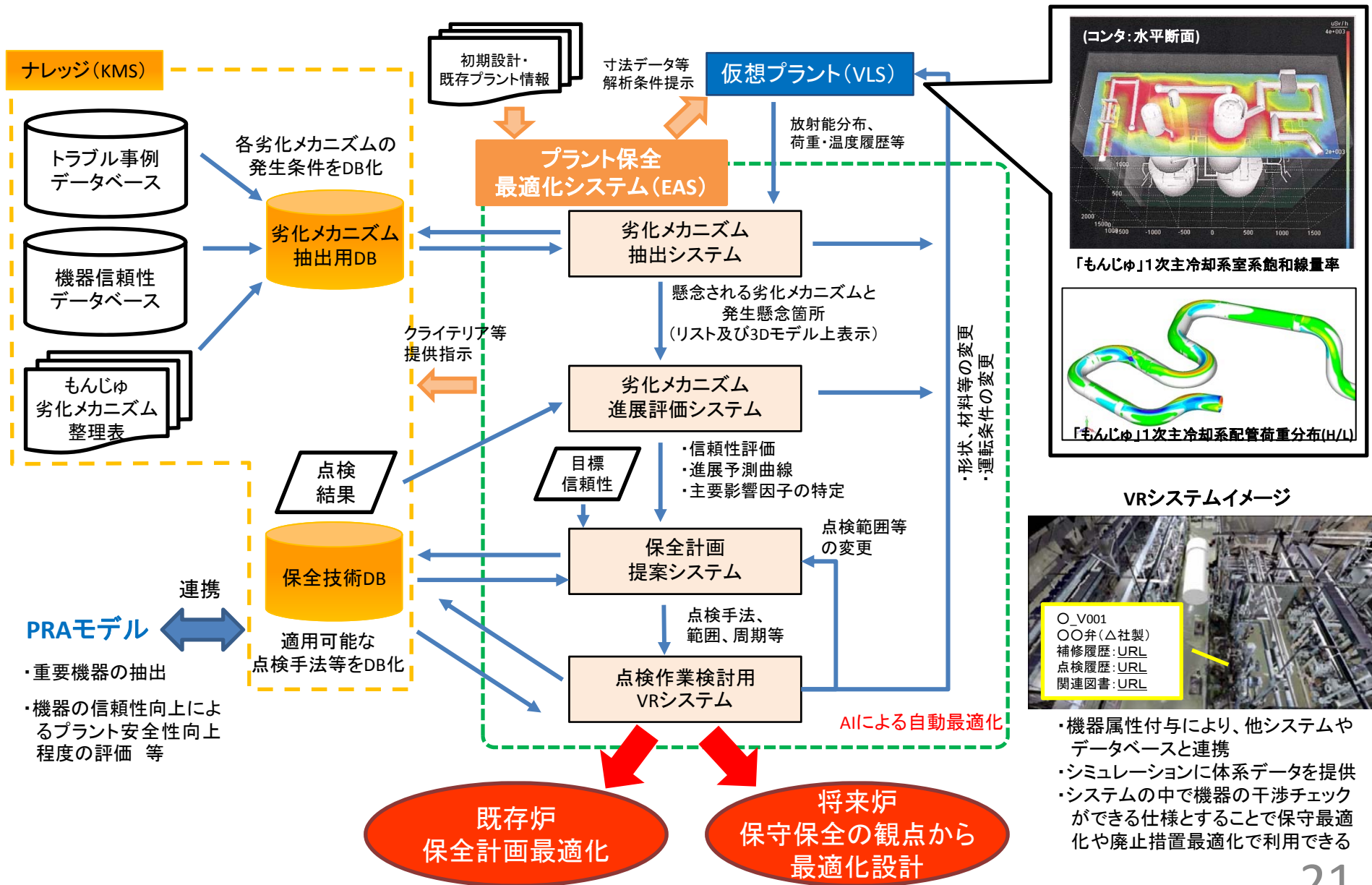
システムの開発・応用を通しての人材育成(研究者・技術者養成、関係大学・研究機関との連携効果)

プラント開発プロセスの変革

実用化に向けて安全性・経済性追求から廃止措置最適化までを可能とする究極のプラント開発支援ツール

- ❖ 融合システム上に構築した数値プラントの運用・設計改善・検証による経験・ノウハウを蓄積(「もんじゅ」等代替)
- ❖ 数値プラントを新設計の機器システムに置換することで、実用化にむけて自在に開発検討・評価が可能

プラント保全最適化システムのイメージ





国内資産の活用(常陽)

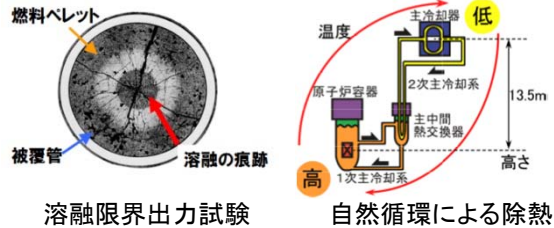
高速実験炉「常陽」のこれまでの成果

高速炉技術の確立

- 増殖性能の確認
- 炉心・プラント特性データの取得 (MK-I、MK-II、MK-III炉心)
- 核燃料サイクルの輪の実証

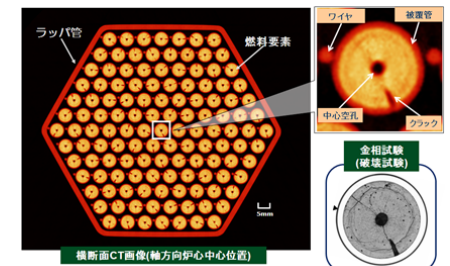
高速炉の安全性の実証

- 自然循環による崩壊熱除去の実証
- MOX燃料の性能確認 (燃料溶融試験、高燃焼度試験の実施)



照射試験・照射後試験

- 世界最高レベルの高速中性子束
- 多様なニーズに対応可能な照射試験用集合体の開発(キャプセル型)
- 最先端の照射後試験技術(X線CT)
- 約100体の照射試験用集合体を装荷



炉心燃料集合体 X線CT画像



「もんじゅ」、実証炉(FaCT)への貢献

- もんじゅ・実証炉開発のための照射試験
- 高燃焼度を目指した被覆管材料(ODS鋼)等の照射試験
- 自己作動型炉停止機構の照射試験

運転保守経験の蓄積、データベース化

- プラントの運転・保守、定検、改造工事等を通じた高速炉プラントの運転保守技術の蓄積
- 高速炉用機器信頼性データベースへの反映
- 保守体系データベース、マニュアルの作成、技術者教育への反映



国際協力

- 米国・仏国との連携・協力 (交換照射の実施、プラント運転・保守経験等の情報交換、駐在員の相互派遣)
- WANO(世界原子力発電事業者協会)、IAEA等を通じた世界各国との情報共有
- OECD/NEAコードベンチマークへの貢献

基礎・基盤研究、外部利用

- 核融合炉材料開発
- 照射損傷研究
- 基礎物理研究



核融合炉材料照射試料



ニュートリノ検出器の性能実験

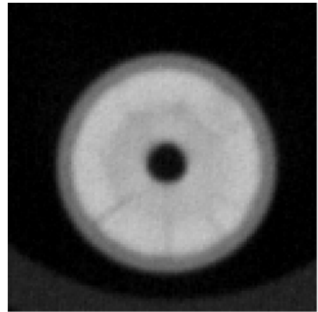


国内資産の活用(常陽)

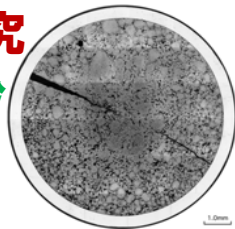
基礎基盤研究 / 多目的利用 / 国際協力

高速炉の基礎基盤研究

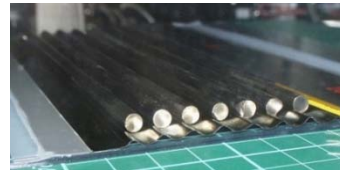
多様な高速炉燃料照射試験



照射した太径中空酸化燃料ピン (X線CT画像)

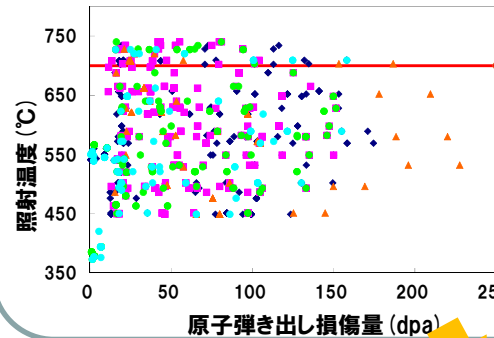


照射した窒化物燃料ピン (断面写真)



U-Pu-Zr燃料スラグ (電中研との共同研究)

高dpaまでの材料照射試験



- ◆ 316 ステンレス鋼
- 改良オーステナイト鋼
- ▲ 高Ni鋼
- フェライト鋼
- ODSフェライト鋼



ODS内圧クリープ破断試料

大学による共同利用

照射キャプセル設計等により協力を維持

- 再起動後、大学連合の共同利用を再開
- 大学窓口での海外利用について打診があり再起動後の限定的な実施を検討。



大学の照射試料(一例)

日米協力(CNWG)における金属燃料照射試験

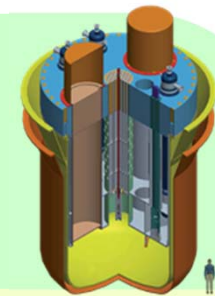
CNWGの新型炉関連のWGの1タスクに「金属燃料」があり、この中で米国側のリクエストとして「常陽」照射試験が挙げられている。

ADS燃料・材料開発

分離変換研究の検討チームに参加

- 高MA燃料(窒化物等)、ビーム窓材料等の照射ニーズ有

核変換研究のみならず、ADS実用化研究開発に貢献するべく、再起動後の材料照射実現を目指す。



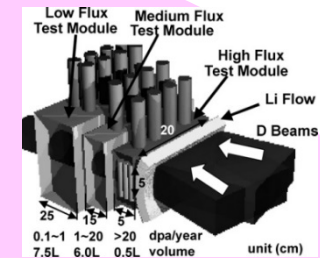
多目的利用ADS MYRRHA

核融合炉材料開発

核融合関係者と情報交換を実施

- ブランケット材料(F82H鋼、SiC/SiC等)及びダイバータ材料(タングステン)の照射ニーズ有(試験条件、試料サイズ、費用等の情報を共有)

小容積のIFMIFの補完的役割を担うことを目標に、再起動後の材料照射実現を目指す。



核融合材料照射施設 IFMIFテストモジュール