

京都大学の研究用原子炉施設

京都大学原子炉実験所

中島健

京都大学原子炉実験所

- 1963年設立
- 全国大学の共同利用研究所
 - 3研究本部(22の研究分野)
:理学、工学、医学、農学、エネルギー科学
- 主要設備
 - 研究用原子炉KUR
 - 臨界集合体実験装置KUCA
 - 電子線型加速器(ライナック)
 - Co-60ガンマ線照射設備
 - イノベーションリサーチラボ(3台の陽子加速器)
150MeV FFAG、FFAG-DDS、BNCTサイクロトロン

共同利用研究について

- 研究用原子炉を用いた実験及びこれに関連する幅広い分野の科学研究を推進するため、全国の大学、国公立研究機関の研究者による共同利用研究を実施。
- 共同利用研究の課題は公募を行い、共同利用研究委員会にて審査して採択。緊急を要する研究課題に対しては即時採択制度もあり、柔軟な体制で最先端の科学研究の推進に努めている。(共同利用研究者には旅費、消耗品費等を支給。装置使用は無料。)
- この他、専門家による研究会やワークショップなどの公募も実施。(参加者の旅費を支援)
- 共同利用研究者の事務的な手続きは、共同利用掛が支援。
- 共同利用に供する装置の担当者である原子炉実験所の研究者(教員)及び技術職員は、(外部の)共同利用研究者を、計画(公募申請)の段階からサポート。
- すべての共同利用研究者は、「原子炉利用研究者グループ」に所属。同グループから、原子炉実験所の運営委員会及び共同利用研究委員会委員に委員(利用者代表)を推薦。
- 実験設備の改良や更新、あるいは変更(研究分野の変更を含む)に当たっては、利用者の要望・ニーズを反映。

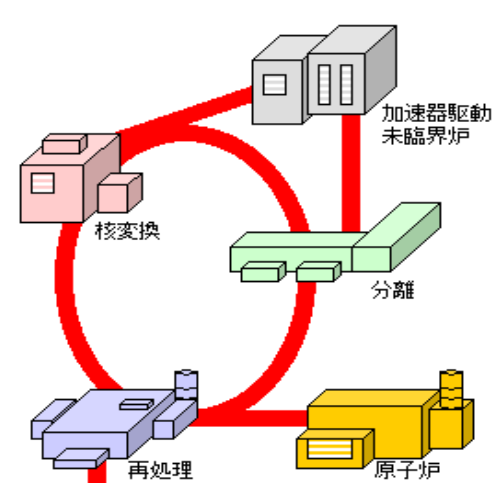
京都大学研究用原子炉:KUR (Kyoto University Research Reactor)

タンク型の軽水冷却軽水減速熱中性子炉
濃縮度約20%のMTR型燃料を使用

- 1964年6月25日に初臨界、同年8月17日に1MW達成
- 1968年7月16日に5MW達成
(出力アップ)
- 1991年の設置変更において、**水冷却研究炉安全設計指針(当時は案)**に対応
- 2010年5月より低濃縮ウラン炉心に移行、この際の設定変更において**水冷却研究炉安全設計及び評価指針**に対応
- 2010年7月に**改訂耐震指針に基づく耐震安全性評価結果報告書**提出(冠水維持機能の健全性を確認)

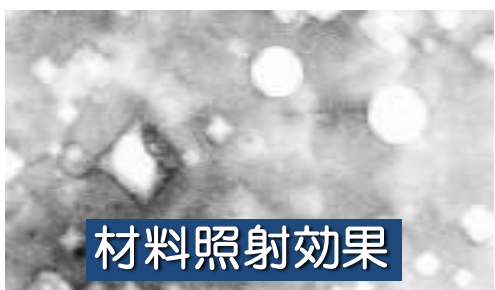


KURの炉心

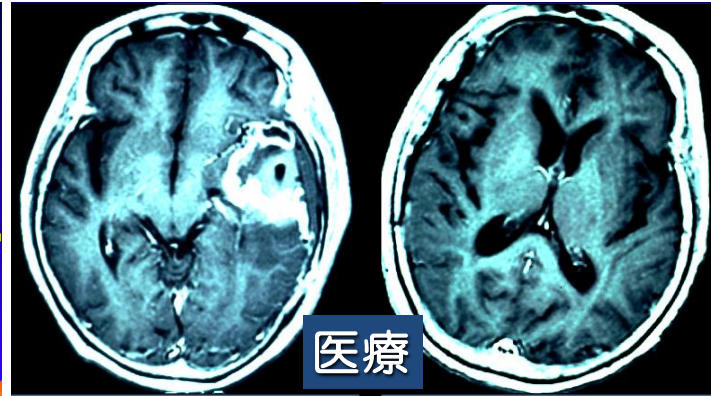
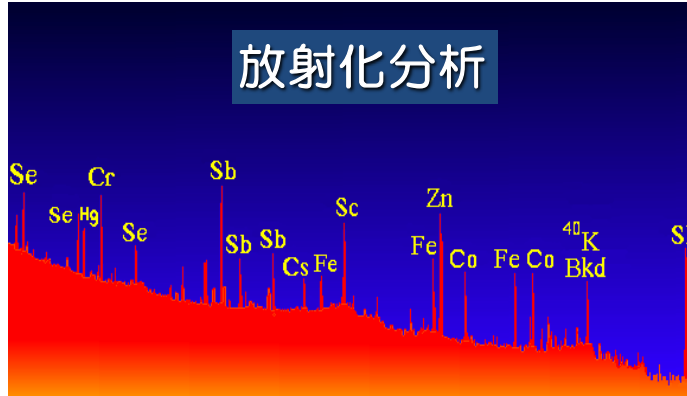


量子リサイクル工学

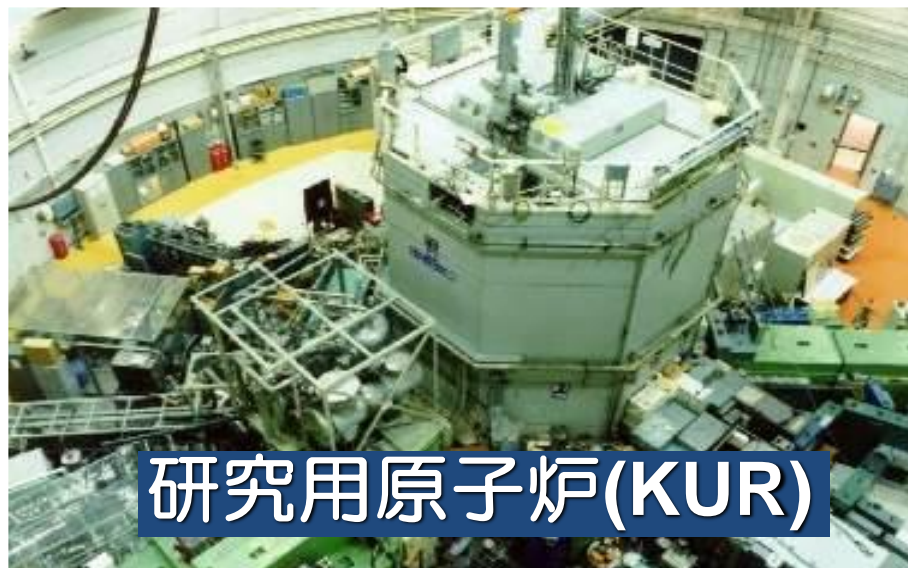
放射能環境動態



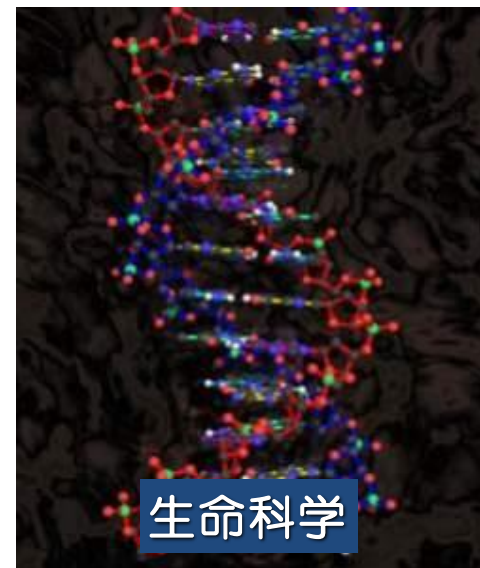
材料照射効果



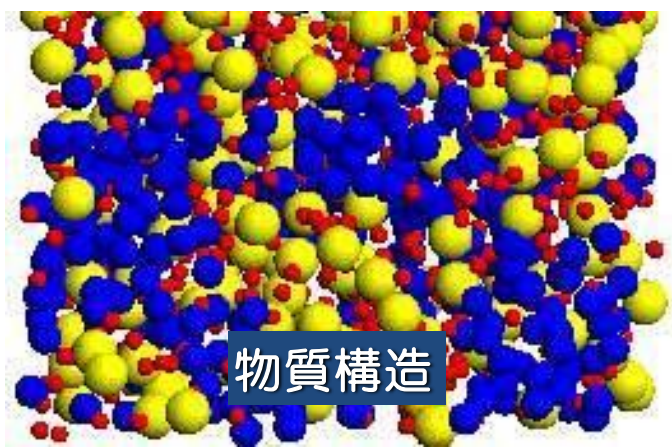
医療



研究用原子炉(KUR)



生命科学



物質構造



中性子ラジオグラフィ

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

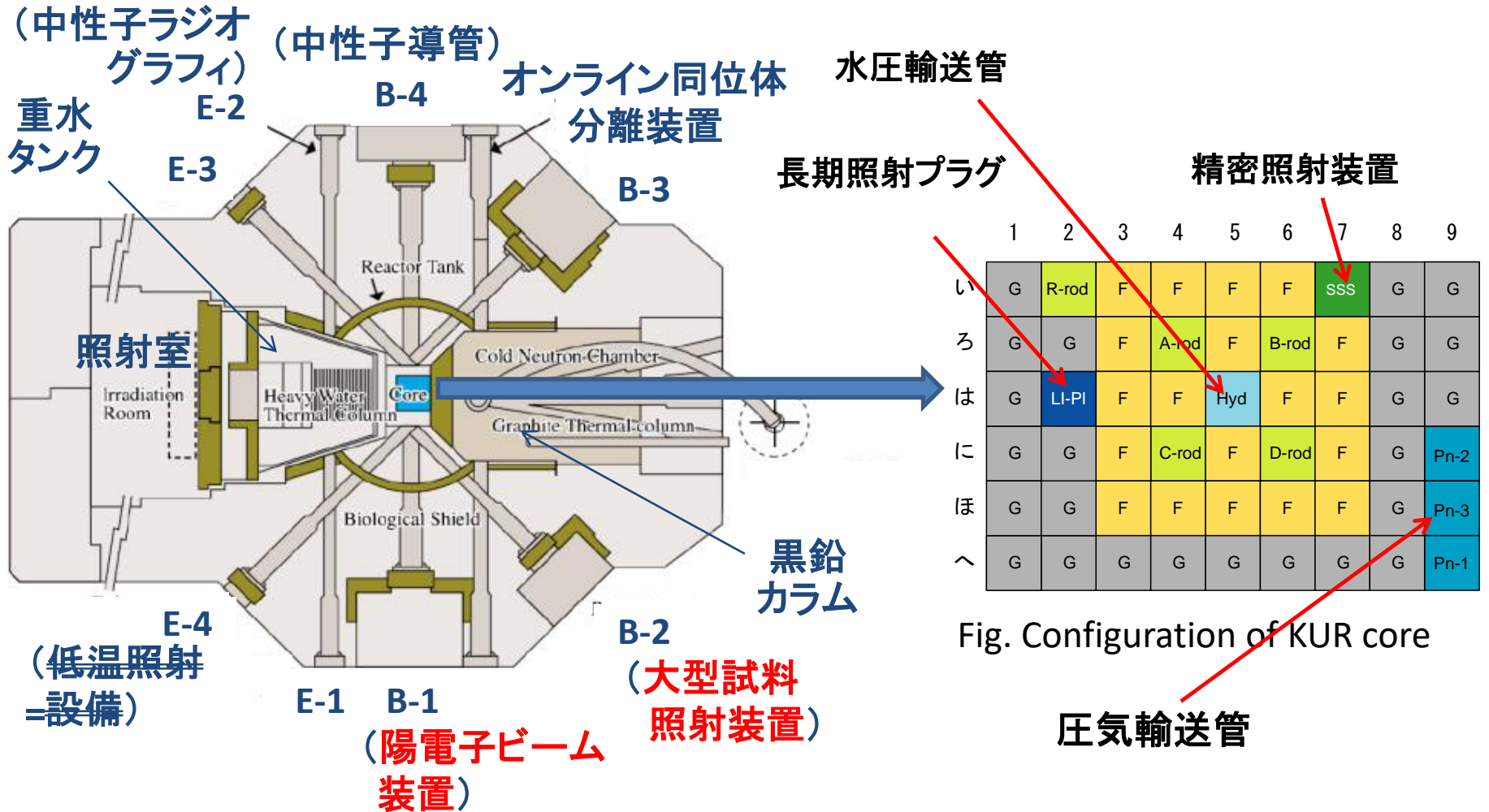
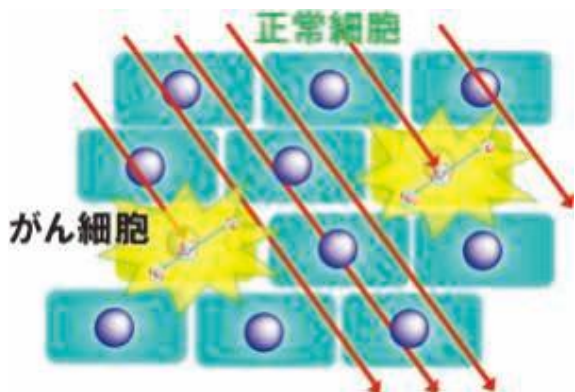
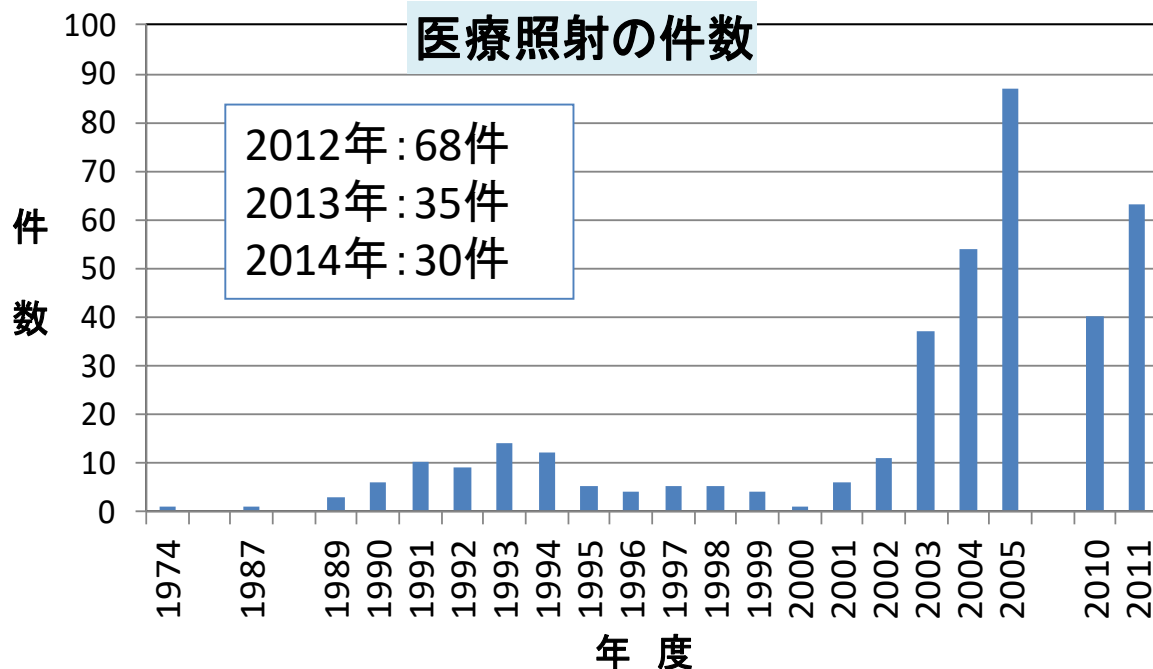


Fig. Plane view of KUR

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.

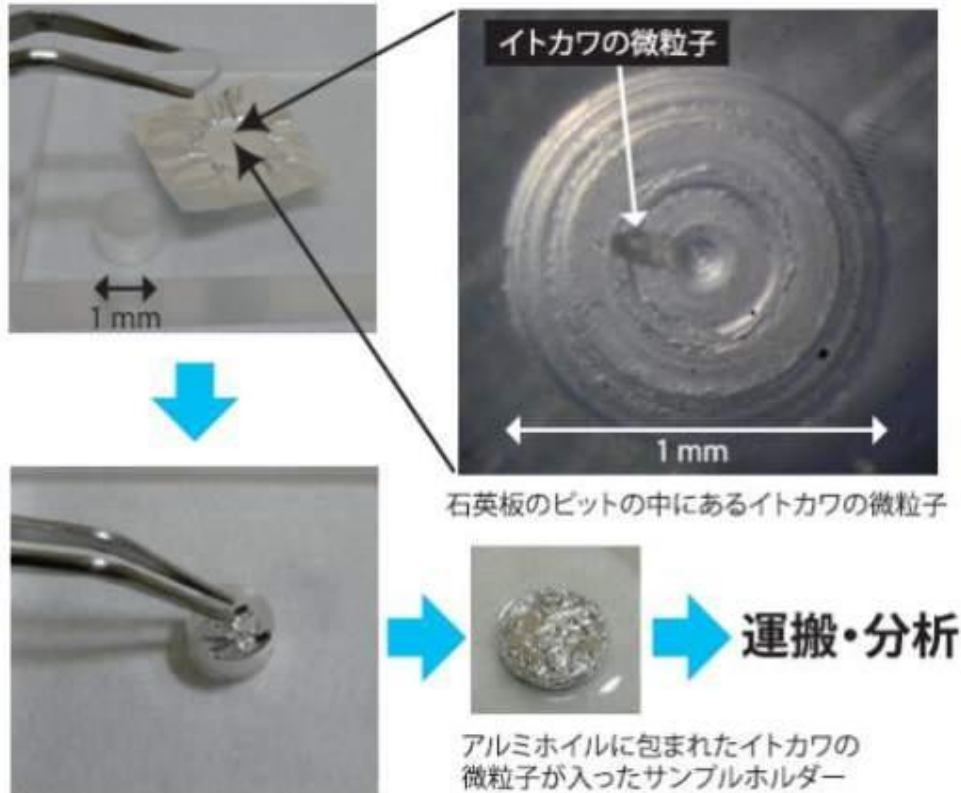


加速器によるBNCT治療



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)

中性子照射による放射化分析



小惑星探査機
「はやぶさ」
(JAXA)



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。

Science (26 Aug.,2011)

KUCA（京都大学臨界集合体実験装置）



- 初臨界:1974年8月
- 最大熱出力 100W
- 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)
- D-T加速器を併設(14MeV中性子源)
- 国内で唯一の大学が所有する臨界実験装置



軽水減速炉心

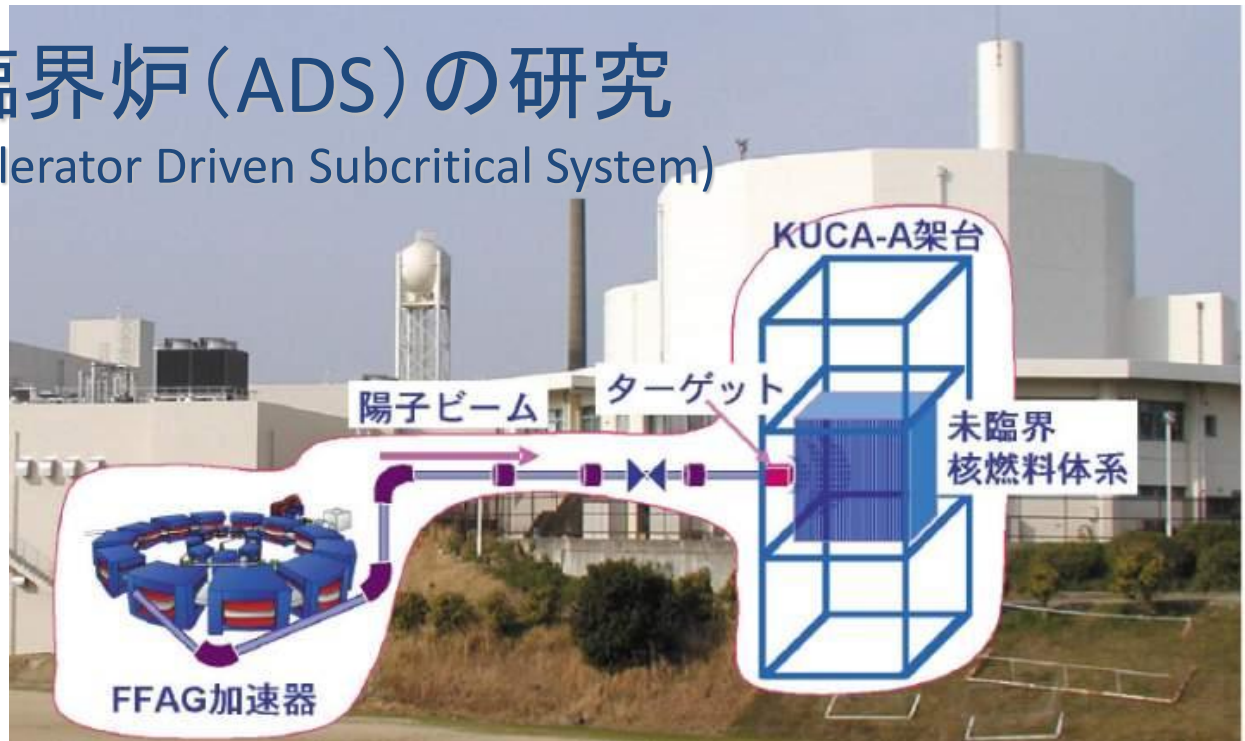


固体減速炉心

2009年に世界発の加速器駆動未臨界システム(ADS)の実験を開始:FFAG陽子加速器からの100MeVの陽子による核破砕中性子により、KUCA固体減速架台の未臨界炉心に入射

加速器駆動未臨界炉(ADS)の研究

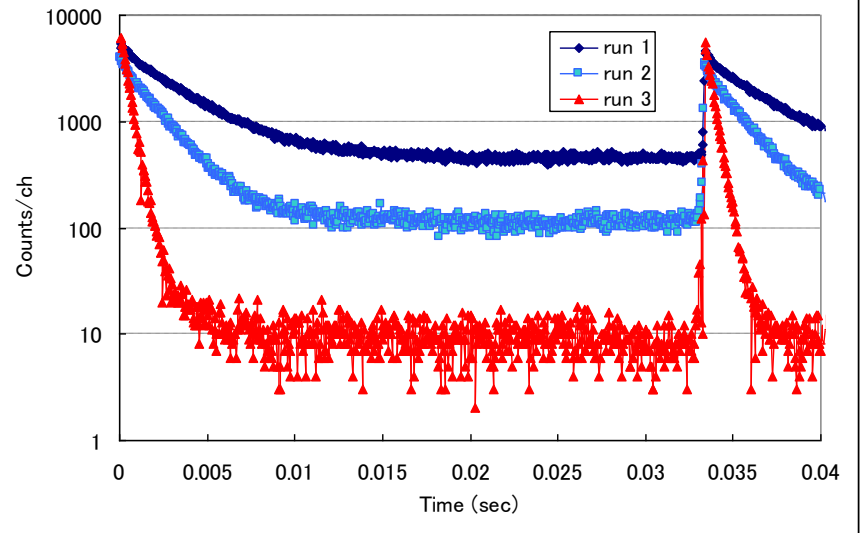
ADS (Accelerator Driven Subcritical System)



単独では運転できない原子炉(未臨界炉)に加速器で発生した中性子を打ち込み、核分裂反応を起こし、エネルギーや放射線が発生させる。



高レベル廃棄物中の長寿命核種(マイナーアクチニド)の短寿命化(核変換)用のシステムとして有望



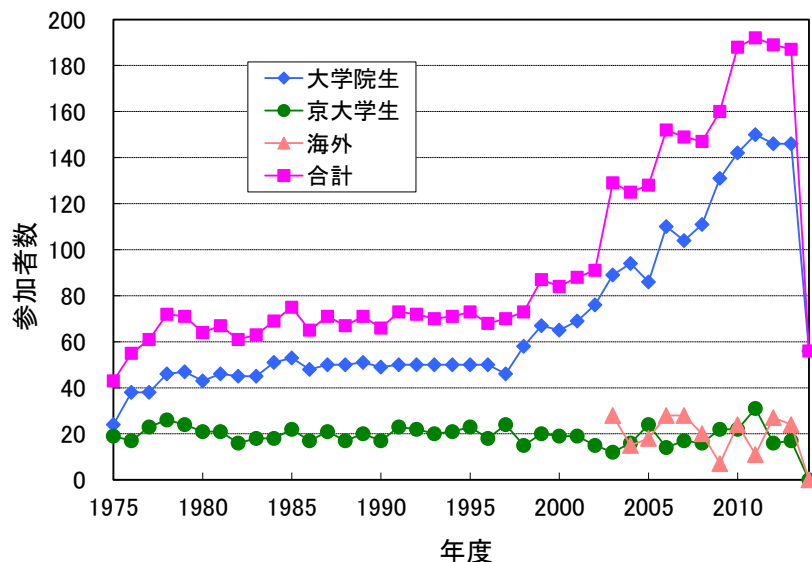
核破碎中性子による中性子増倍の様子

実験所での実験教育の歴史など

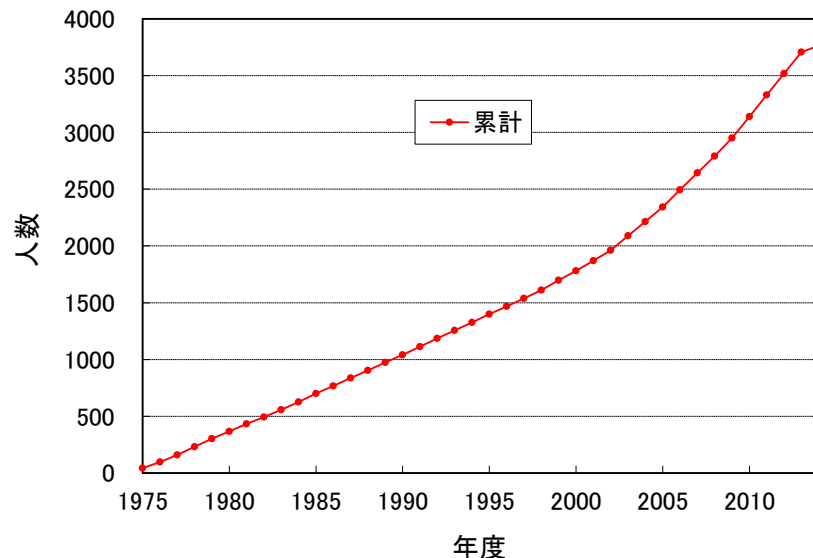
- 1964年 研究炉(KUR)初臨界
- 1974年 臨界集合体(KUCA)初臨界
- 1975年 KUCAを用いた大学院生実験を開始
- 1970年代 原子核工学専攻原子炉利用実験開始
- 2006年 KUR・高濃縮ウラン燃料炉心終了
- 2007年 日本原子力学会賞(貢献賞)注)
- 2010年 KUR・低濃縮ウラン燃料炉心臨界到達
- 2010年 KUCAを用いた大学院生実験3000名到達



注)「京都大学臨界集合体実験装置(KUCA)を用いた炉物理実験教育」



臨界集合体を用いた実験の受講学生数 (2014年度まで)



臨界集合体を用いた学生実験の累積受講学生数

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



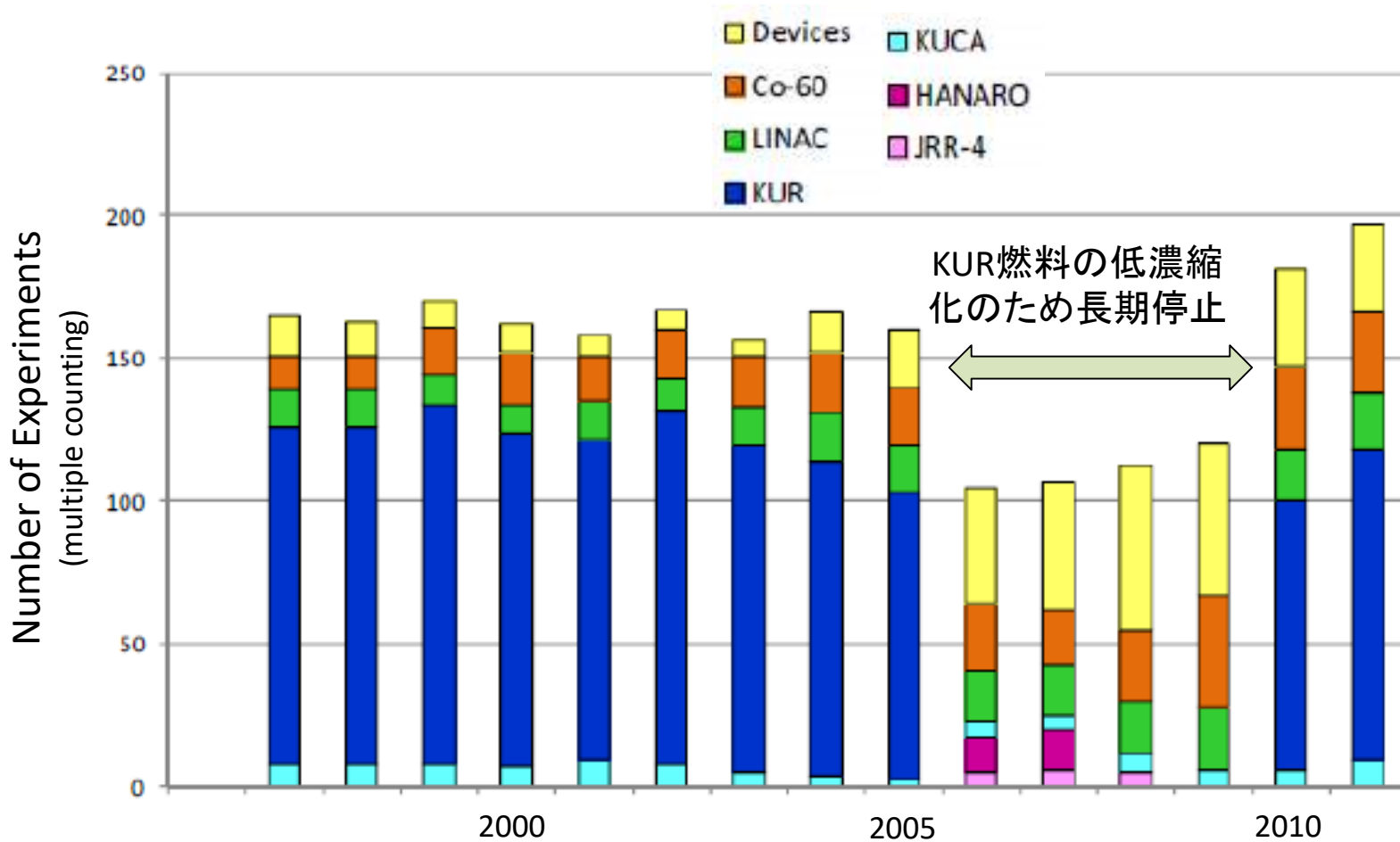
- 水曜日：制御棒校正実験、中性子束分布測定(放射化量測定)



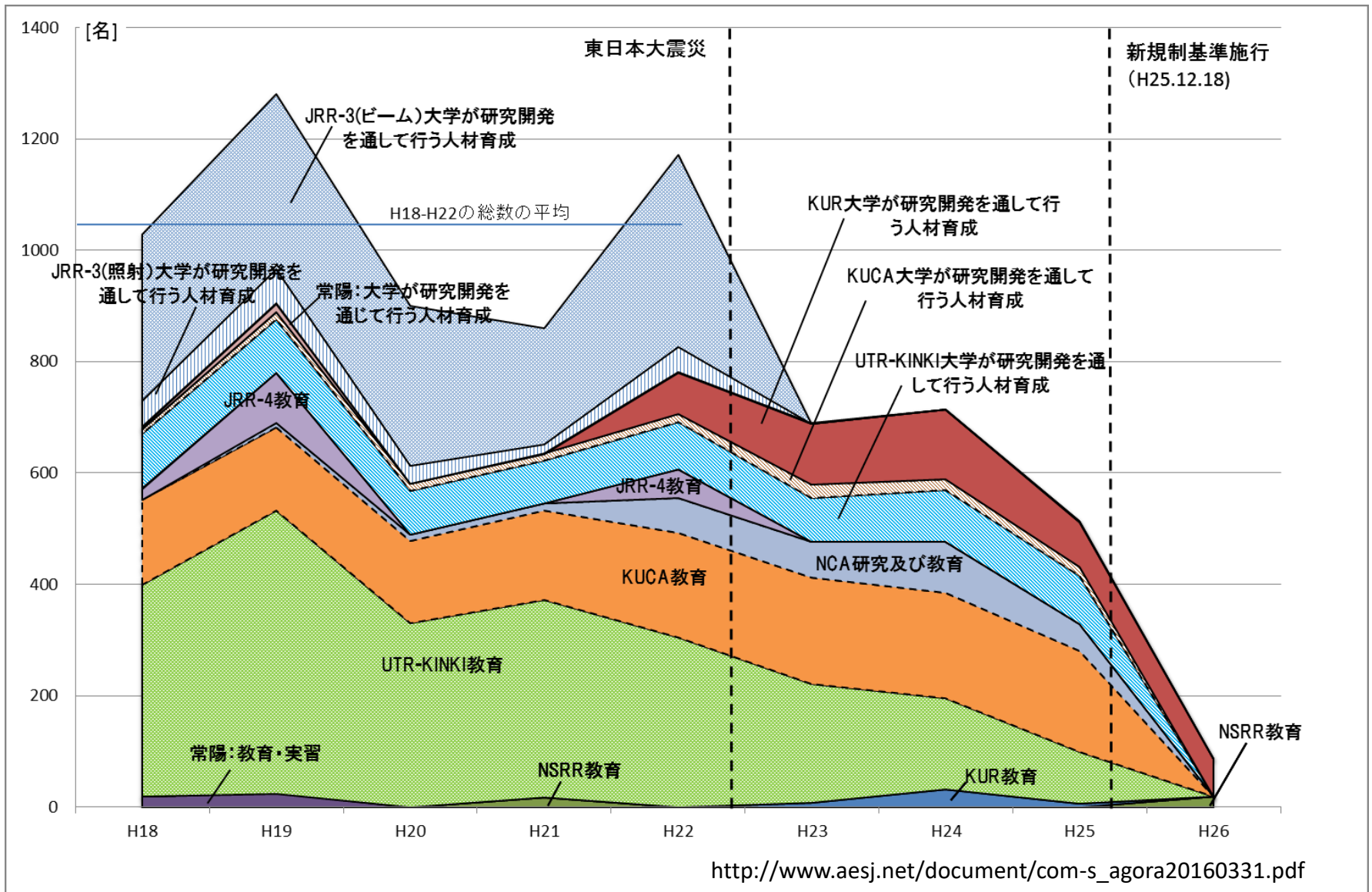
- 木曜日：運転実習、討論会



実験設備の利用状況



研究炉利用の学生数(研究・教育)



新規制基準への対応の経緯

(試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則)

| | |
|------------------------------------|---|
| 2011年3月11日 | 東京電力福島第一発電所事故 |
| 2012年9月19日 | 原子力規制委員会発足 |
| 2013年7月8日 | 原子力発電所の新規制基準施行 |
| 2013年12月18日 | 核燃料施設等(研究炉を含む)の新規制基準施行 |
| 2014年9月30日 | KUR及びKUCAの申請 設置変更承認申請書及び保安規定変更承認申請書を原子力規制庁に提出 |
| 2015年9月30日、12月10日、2016年3月31日 | KUCA設置変更の一部補正申請 |
| 2016年4月27日 | KUR設置変更の一部補正申請 |
| 2016年5月11日 | KUCA設置変更の承認(合格) |
| 2016年6月22日、6月27日、7月12日、7月20日、7月27日 | KUR設置変更の一部補正申請 |
| 2016年8月29日 | 保安規定変更の承認(KUCA関係) |
| 2016年9月21日 | KUR設置変更の承認(合格) |
| 2016年10月5日 | 保安規定変更申請(KUR関係) |
| 2017年2月28日 | 保安規定変更の承認 |



その後、新規制対応のための各種工事等を実施。
現在、運転再開に向けて、使用前検査、施設定期検査を実施中。

試験研究炉の新規制基準

- 高中出力炉等、事故時に及ぼす影響が大きい試験研究用等原子炉施設について「**多量の放射性物質等を放出する事故の拡大の防止**」を追加要求
【想定(=設計基準)を超える事故の評価】
- 自然災害(**地震・津波、洪水、風、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、地滑り、火山、森林火災等**)の評価方法を厳格化
- 外部人為事象(第三者の不法な接近)等に対する考慮を明確化
- 敷地内の外部研究者や見学者等に対する事故の発生の連絡や必要な指示を行うための対策を要求

すでに認可を受けている施設に対しても新規制基準への適合が義務づけられる＝「**バックフィット制度**」

KUR設置変更の主な内容

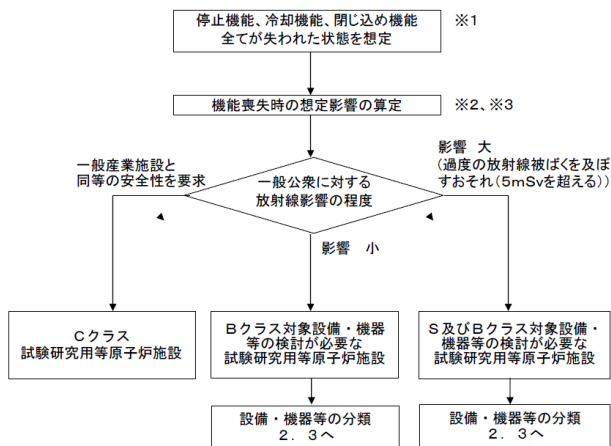
- **重要度分類(耐震、安全機能)の見直し**
→ 止める(停止)及び冷やす(冠水維持)機能が重要
- **地震、津波、竜巻、火山、外部火災・内部火災等について、発電炉に準じた手法による評価の実施**
→ 止める及び冷やす機能の確保
(電源も含めた多重性・多様性の確保)
- **安全評価において設計基準を超える事象を想定し、その拡大防止に必要な対策を説明**
→ 冷やす機能の喪失による燃料損傷
- **設計及び工事に関する品質保証体制・活動の追記**
- **申請書全体について、最新の情報・データへの更新、冗長な記載等の適正化**

KUCA設置変更の主な内容

- **重要度分類**(耐震、安全機能)の見直し
→ 止める(停止)機能が重要
- **地震、津波、竜巻、火山、外部火災・内部火災**等について、発電炉に準じた手法による評価の実施
→ 止める機能の確保(停止後の確認のために無停電電源を設置)
- **実験(運転)上不要な機能の取り止め・変更など**
→ 最大出力を100W、積算出力100Wh/月(従来の短時間のみ1kWを削除)
→ 自動制御機能の取り止め
→ 非常用ディーゼル発電機、非常用排気設備、負圧維持の取り止め
(非常用電源は無停電電源に変更、空調設備は自主的に残す)
- **設計及び工事に関する品質保証体制・活動の追記**
- 申請書全体について、最新の情報・データへの更新、冗長な記載等の適正化

新規制基準への対応(1)

地震・(津波)対策: 基準地震動の策定



耐震重要度分類の考え方

規則の解釈から抜粋



研究用原子炉(KUR)はSクラスの施設・設備が存在

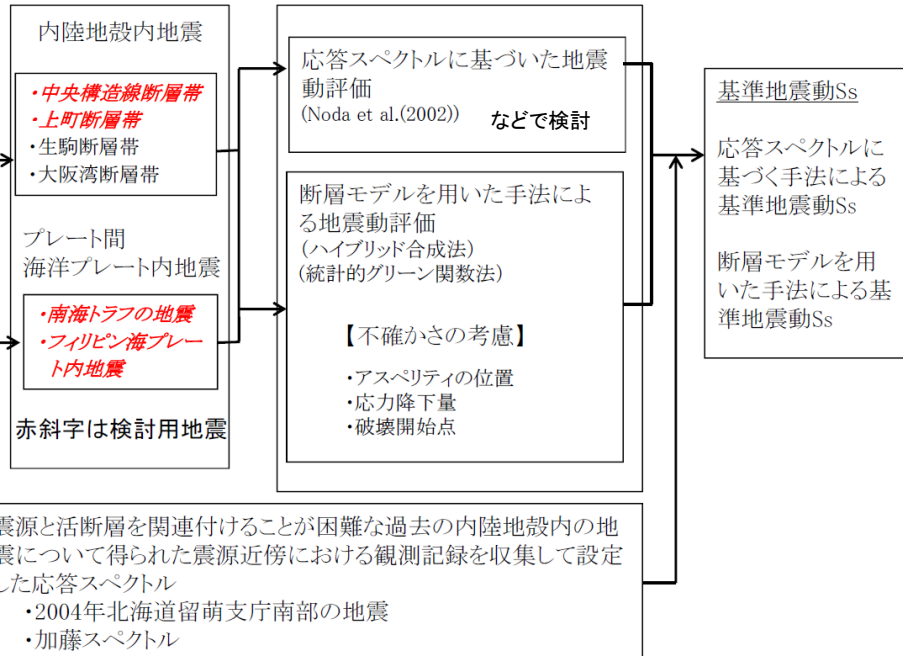


基準地震動の策定とそれによる耐震安全性の確認が必要

敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

- 敷地周辺の地質・地質構造(活断層)
 - 主として文献調査
- 敷地及び近傍の地質・地質構造
 - 文献調査
 - ボーリング調査
 - 微動探査
- 敷地周辺で発生する地震に関する調査
 - 地震発生様式
 - 過去及び現在の地震発生状況

震源を特定せず策定する地震動

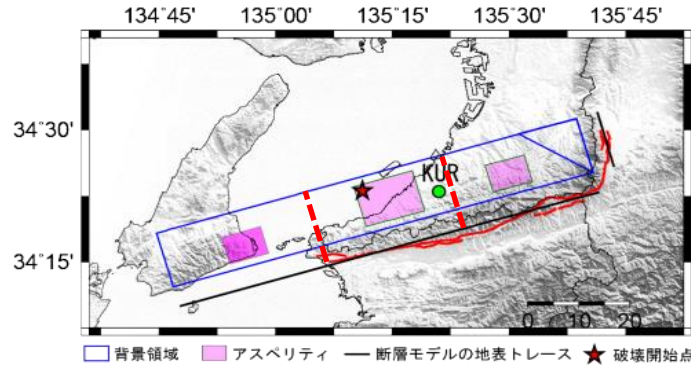


基準地震動Ssの策定フロー

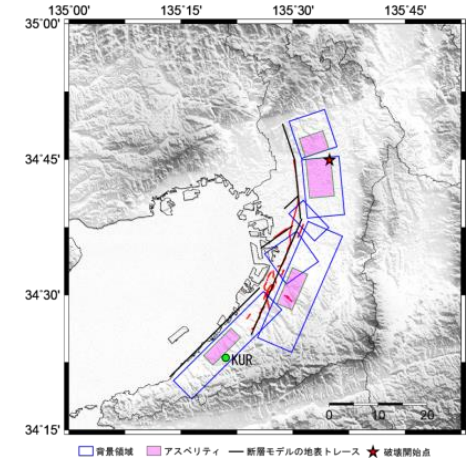
基準地震動 S_s を策定するための検討用地震

内陸地殻内地震

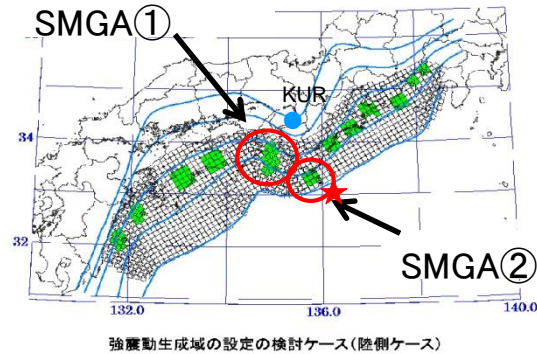
- : 強い地震動が生成される場所
その位置の不確かさとして敷地直下に設定したケースも考慮
- ★ : 破壊開始点(例)



中央構造線断層帯による地震(M8.1)の震源断層モデル

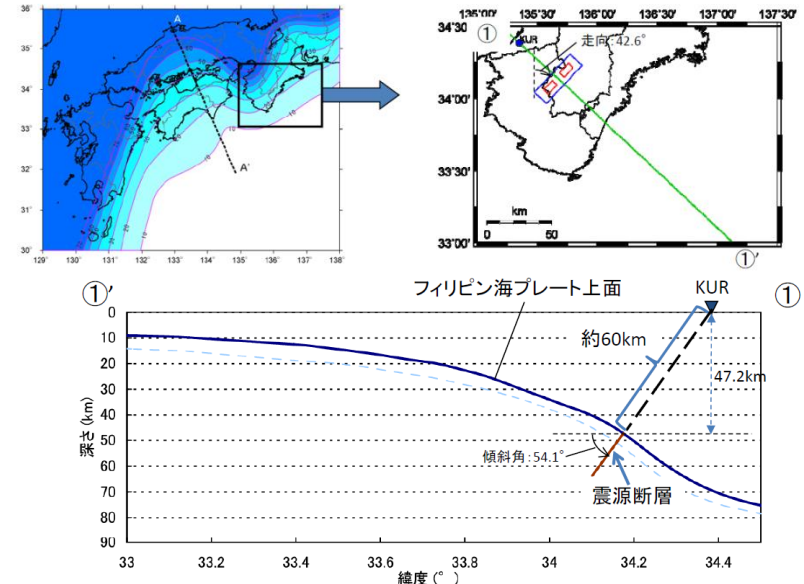


上町断層帯による地震(M8.0)の震源断層モデル



- : 強い地震動が生成される場所
その位置の不確かさとしてSMGA①、②を敷地に近づけたケースも考慮
- ★ : 破壊開始点(例)

プレート境界地震(南海トラフの超巨大地震:M9.0)



- : 強い地震動が生成される場所
- プレート内地震(M7.4)

新規制基準への対応(2)

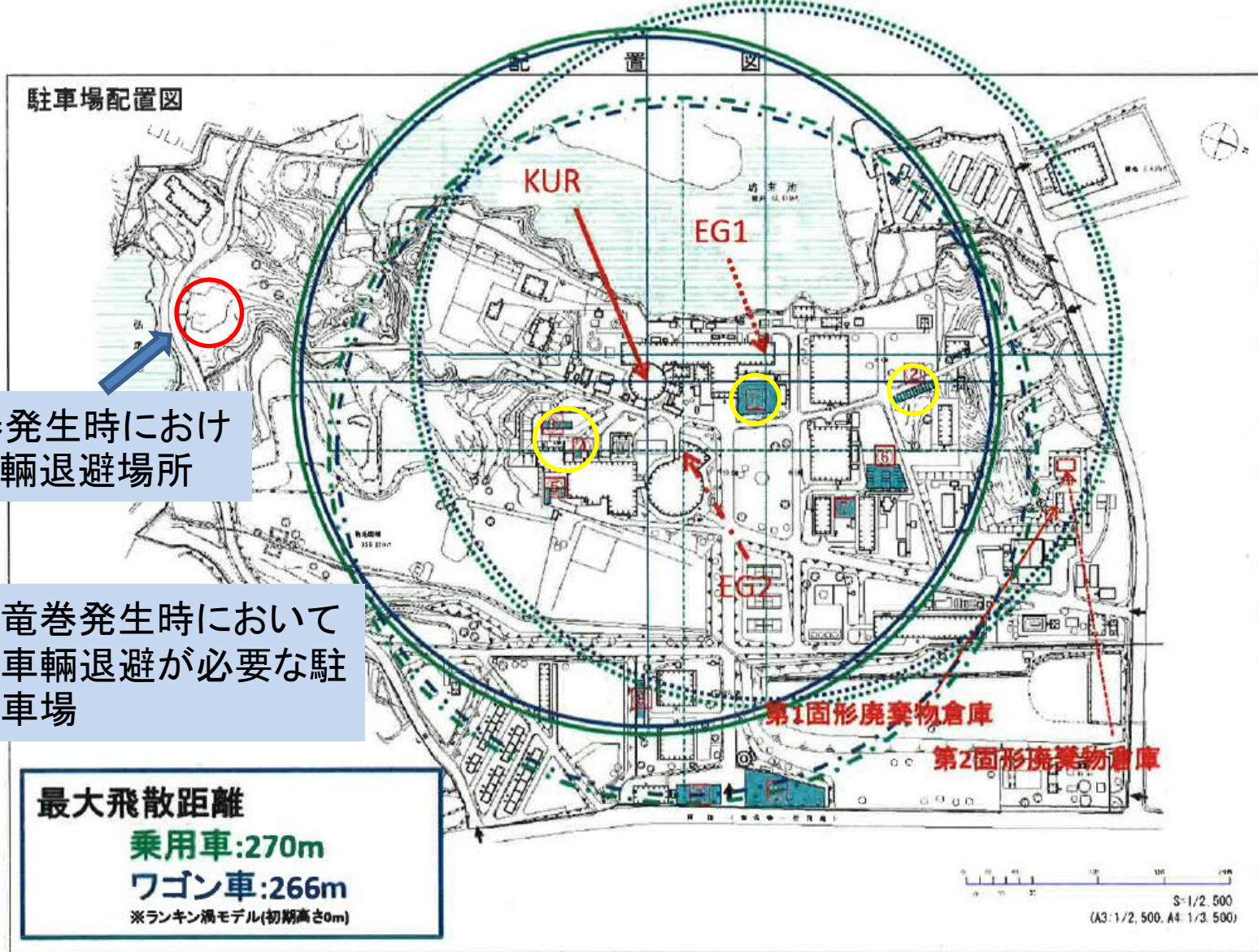
- 外部事象(地震・津波以外):洪水、風、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、地滑り、火山、生物学的事象、森林火災等
 - 竜巻: F3(風速92m/s)を想定し、風力及び飛来物から重要設備を防護(一部施設の補強、固形廃棄物の固縛)
竜巻情報の監視 → 車両の退避、炉の停止
 - 火山: 160km以遠の火山活動により最大約2cmの降下火砕物の堆積を想定 → 堆積物の除去、炉の停止
 - 森林火災: 早期検知し、延焼防止のために散水を実施。予防散水エリア及び散水栓を整備
- 内部事象: 内部溢水、内部火災
 - 内部溢水: 冷却水等の漏えいを想定 → 電源系の多重化
 - 内部火災: 火災発生防止・早期検知と消火、延焼の防止 → 物品持込み制限、検知器、防火シャッター等の設置

8. 竜巻影響評価のまとめと竜巻防護対策

8.1 竜巻影響評価のまとめ

- (1) 敷地立地地点の地形条件や気象条件の類似性から、IAEAの基準を参考に、敷地を中心とする半径180km圏内を竜巻検討地域とした。ただし、竜巻発生特性が異なる日本海側は除外する。
- (2) 基準竜巻の最大風速(V_B)は、竜巻検討地域で発生した最大竜巻がF2であることから、 V_{B1} は69m/sとなり、一方、ハザード曲線による最大風速 V_{B2} は55m/sとなることから、 $V_B=69\text{m/s}$ とした。
- (3) 設計竜巻の最大風速(V_D)は、竜巻評価の不確実性や施設への保守性を考慮し、F3相当の92m/sとした。
- (4) 竜巻防護施設は、耐震Sクラスの施設・設備に加え、非常電源設備(EG1及びEG2)とした。なお、第1、第2固形廃棄物倉庫については、廃棄物ドラム缶を強固に固縛することによる飛散防止対策を行うため、外郭となる建屋の健全性は評価対象外とした。
- (5) 設計飛来物としては、所内ウォークダウンの結果やガイドを参考に、所内の対象物としては空調室外機を考え、所内の車両については駐車場と竜巻防護施設との離隔距離やその間の障害物の有無と飛散距離・軌跡を考慮した上で、必要な車両については離隔距離を確保できるように避難させることとした。周辺道路など所外の車両については離隔距離によって評価対象外とした。
- (6) 防護対象施設の内、設計飛来物に対する貫通評価の結果、臨界集合体棟周辺建屋の一部についての壁のみ防護対策が必要である。
- (7) 防護対象施設の外殻としての構造健全性(風圧力や気圧差)については評価方針に従って今後検討し、防護対策の要不要を確認する。

竜巻による車両飛散範囲と対策（退避）



森林火災に対する延焼防止エリアの設定と予防散水

- : 延焼防止エリア
- ▨ : 散水範囲
- : 森林境界

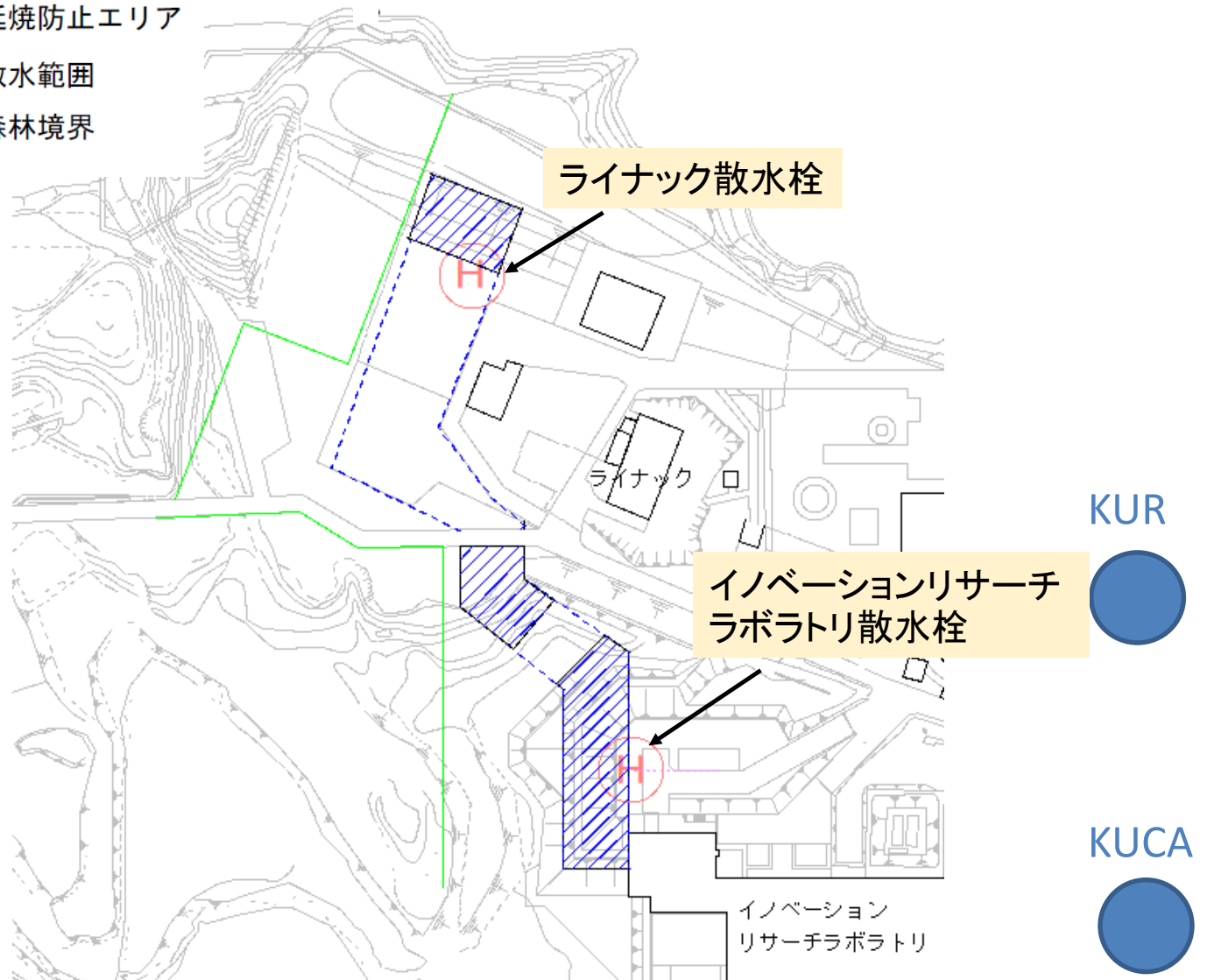
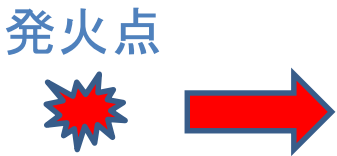


図-2 散水設備位置

新規制基準への対応(3)

多量の放射性物質等を放出する事故
(公衆被ばくが5mSvを超える可能性のある事故)

- **流路閉塞の拡大による放射性物質の放出**
炉心冷却水流路の閉塞による冷却機能喪失
 - **冷却材喪失事故(LOCA)の拡大による放射性物質の放出**
LOCA時の冷却失敗などによる冷却機能喪失
 - **上記2つの事故への対応策**: 可搬型消防ポンプによる注水を含む緊急注水の実施。炉心タンク上部のシール等による放射性物質拡散の抑制。実験者・見学者等の避難・誘導。放射線モニタリングと地元自治体等への情報提供。
- **大規模損壊事象への対応**も検討

KUR設備の主な工事等

- **耐震性の確認**

KUR建屋等の耐震性確認。(書類上の確認)

- **安全保護回路の変更**

安全保護回路の多重化。

実験設備の使用取り止めによる該当する警報及びスクラム項目の削除。

- **非常用電源の強化**

従来のKUCA用の非常用発電機(EG)をKUR用に変更し、KUR用EGを2台とする(多重化)。監視設備用の無停電電源の容量を増強する。

- **内部火災対策**

原子炉施設内の可燃物の管理を徹底するとともに、火災報知器・消火設備等を整備。ケーブル・機器等を保護するために、断熱材で覆う等の対策の実施。

- **外部火災対策**

森林火災から施設を保護するため、防火帯(予防散水エリア)整備、散水栓設置、消防体制整備の実施。

- **竜巻対策**

非常用電源室(KUCA)の壁厚増強、非常用電源用屋外冷却塔(KUR)の防護設備設置、竜巻監視システムの導入と竜巻発生時の自動車退避等の実施。

KUCA設備の主な工事等

- **安全保護回路の変更**

最大出力の変更、自動制御運転の取りやめによる該当する安全保護回路を変更する。

- **非常用電源の強化**

監視設備用の無停電電源の容量を増強する。

- **内部火災対策**

ハロン消火設備、遮熱板を設置し、炉心を防護する。

- **外部火災対策(KURと共通)**

森林火災から施設を保護するため、防火帯(予防散水エリア)整備、散水栓設置、消防体制整備の実施。

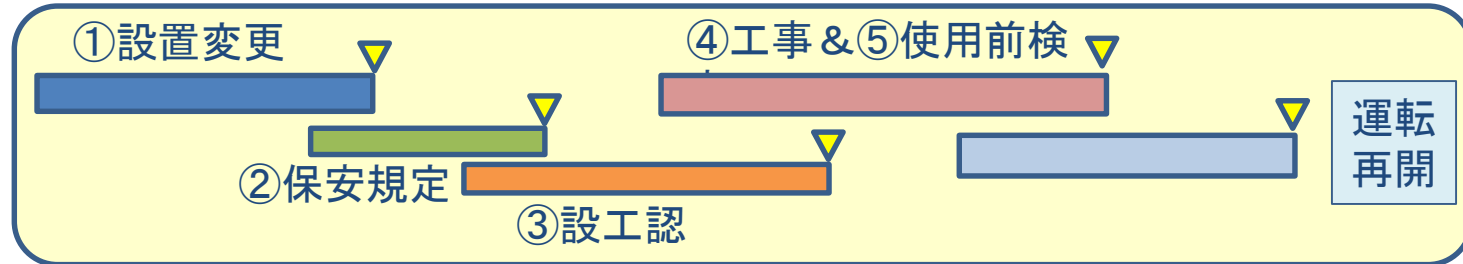
- **固形廃棄物倉庫の安全性強化(KURと共通)**

倉庫の耐震補強。

固形廃棄物の固縛設備を設置(竜巻対策)。

再開までの流れ

再開までの流れ



その他: 運転員等の教育・訓練、防災訓練などの実施

- ① 設置変更承認申請、同承認
- ② 保安規定変更承認申請、同承認
- ③ 設計及び工事の方法の承認申請、同承認
- ④ 工事の実施
- ⑤ 使用前検査
- ⑥ 施設定期検査

その他: 使用前検査終了後に保安検査を実施し、保安規定の実施体制等を確認の予定

研究炉の課題

- 人員・経費
 - 新規制基準適合確認のため、長期間にわたり教員・技術職員が対応（→ 再稼働後も種々の対応が必要）
 - 安全管理の品質保証対応のため、多大な労力を注入
 - 運転要員の不足（KUR 5MW運転時の要員の増加）
- 使用済燃料（SF）の取扱い
 - 2026年までに生じたSFはDOEが受入れ（2029年までに返送が必要）
 - 以後の受入れは（原則）行われない
 - 2026年以後に運転を行うには、SF取り扱いの議論が必要
- KUCA燃料の低濃縮化
 - 高濃縮ウラン返送の問題、低濃縮ウランの仕様検討・調達方法検討
- 安全規制・セキュリティ強化への対応
 - 人員及び経費の確保：定員削減への対応、警備・安全対策の経費
- 施設の高経年化対応
 - 当面（10年程度）は維持可能、長期的には大規模更新が必要（KUR）
 - 廃止措置の検討（人員、予算、廃棄物の処分）

今後に向けて

- 研究炉の重要性・必要性は、今後も変わらない(→ 研究開発及び人材育成)
- 研究炉の設置(設計から運転開始まで)には、長期(10-20年)のリードタイムと多大な経費が必要。また、国内では研究炉の建設が、20年近く行われていない(経験値の低下)
- 一方、大学では規制強化、運営費・人員削減等により、研究炉の維持が困難な状況に。長期的な研究炉維持のためには、運営体制の検討が必要(国際的な機能分担なども考慮)
 - 安全確保が最優先だが、そのために利用しにくくなることは本末転倒
 - また、使用済燃料の取扱いについては、国としての方針決定が必要
 - 医療用RI製造、Siドーピング等の商用利用により、維持費を賄うシステムも長期運営には必要
- 原子力人材育成の観点からは、小型炉の方が有用(JMTRとJMTRCのような2炉心併設の原子炉?)



研究開発の動向、既存設備の状況などを踏まえ、日本にとって必要な施設とその運営体制を(速やかに)決定するべき。