

令和6年3月23日
早稲田大学・東京都市大学 共同原子力専攻
第18回未来エネルギーフォーラム・シンポジウム
「原子力人材育成と加速器で変わる世界」
@西早稲田キャンパス63号室203・204・205会議室

原子力と人材育成

Nuclear Technology and Human Resource Development

内閣府原子力委員会委員長
上坂 充

本資料には講演者の個人的視点に基づく内容が
含まれています。

内 容

1. 原子力政策

2. 人材育成

- ・ 厳しい専門教育
- ・ 夢のある自由な研究

3. まとめ

日本におけるエネルギー政策

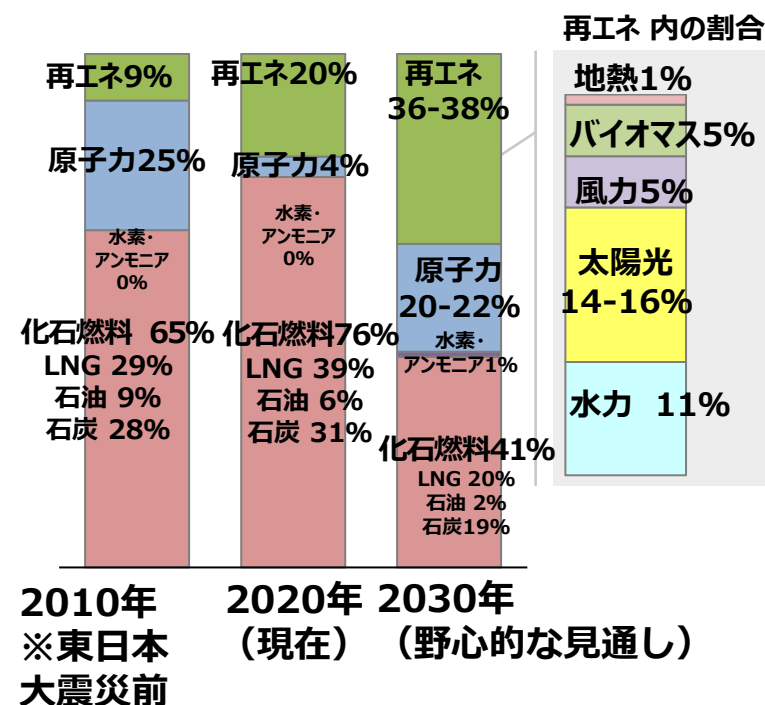
政策目標

- ✓ 2050年カーボンニュートラル達成
- ✓ 中長期的な経済成長
- ✓ 安定的なエネルギー供給

これらの政策目標の達成手段の一つとして原子力発電があげられる。

電源構成

エネ基では、原子力発電は2030年に20～22%程度を見込んでいる。



「原子力利用に関する基本的考え方」ポイント

1. 基本的考え方について 及び 改定の背景

- 今後の原子力政策について政府としての長期的方向性を示す羅針盤となるものであり、**原子力利用の基本目標と各目標に関する重点的取組を定めている。**
- **平成29年（2017年）7月**に「原子力利用に関する基本的考え方」を**原子力委員会で決定、政府として尊重する旨閣議決定。**
- 「今日を含め原子力を取り巻く環境は常に大きく変化していくこと等も踏まえ、『原子力利用に関する基本的考え方』も**5年を目途に適宜見直し、改定するものとする。**」との見直し規定があり、**令和3年11月には、改定に向けた検討を開始することについて原子力委員会にて公表し、以来、有識者へのヒアリングと検討を重ね、令和5年2月20日に原子力委員会で改定し、2月28日に閣議にて、政府として尊重する旨、決定された。**

2. 本基本的考え方の理念

原子力利用について:

- 原子力はエネルギーとしての利用のみならず、工業、医療、農業分野における放射線利用など、幅広い分野において人類の発展に貢献しうる。
- エネルギー安全保障やカーボンニュートラルの達成に向けあらゆる選択肢を追求する観点から、原子力エネルギーの活用は我が国にとって重要。
- 一方で、使い方を誤ると核兵器への転用や甚大な原子力災害をもたらし得ることを常に意識することが必要。
→原子力のプラス面、マイナス面を正しく認識した上で、安全面での最大限の注意を払いつつ、原子力を賢く利用することが重要となる。

3. 原子力を取り巻く現状と環境変化

- エネルギー安定供給不安/地政学リスクの高まり
- カーボンニュートラルに向けた動きの拡大
- 世界的な革新炉の開発・建設/既設原発の運転期間延長
- 原子力エネルギー事業の予見性の低下
- テロや軍事的脅威に対する原子力施設の安全性確保の再認識
- 非エネルギー分野での放射線利用拡大
- 経済安全保障の意識の高まり
- ジェンダーバランス等、多様性の確保の重要性増加

4. 今後の重点的取組について

- 「安全神話」から決別し、安全性の確保が大前提という方針の下、安定的な原子力エネルギー利用を図る。その際、円滑な事業を進めるための環境整備に加え、放射性廃棄物処理・処分に係る課題や革新炉の開発・建設の検討等に伴って出てくる新たな課題等に目を背けることなく、国民と丁寧にコミュニケーションを図りつつ、国・業界それぞれの役割を果たす。
- 原子力エネルギー利用のみならず、非エネルギー利用含め、原子力利用の基盤たるサプライチェーン・人材の維持強化を国・業界が一体となって取り組む。

① 東電福島第一原発事故の反省と教訓

- 福島の着実な復興・再生
- ゼロリスクはないとの認識の下での継続的な安全性向上への取組・業務体制の確立・安全文化の醸成・防災対応の強化
- 国及び事業者による避難計画の策定支援等を通じた住民の安全・安心の確保
- 原子力損害賠償の在り方についての慎重な検討

② エネルギー安定供給やカーボンニュートラルに資する原子力利用

- 原発事業の予見性の改善に向けた取組
- 既設原発の再稼働
- 効率的な安全確認
- 原発の長期運転
- 革新炉の開発・建設
- 安定的な核燃料サイクルに向けた取組
- 使用済燃料の貯蔵能力拡大

③ 国際潮流を踏まえた国内外での取組

- グローバル・スタンダードのフォローアップ
- グローバル人材・スタンダード形成への我が国の貢献
- 価値を共有する同志国政府や産業界間での、信頼性の高い原子力サプライチェーンの共同構築に向けた戦略的パートナーシップ構築

④ 原子力の平和利用及び核不拡散・核セキュリティ等の確保

- プルトニウムバランスの確保
- テロや軍事的脅威に対する課題への対応
- IAEA等と連携したウクライナ支援

⑤ 国民からの信頼回復

- ルール違反を起こさず、不都合な情報も隠蔽しない
- 専門的知見の橋渡し人材の育成

⑥ 国の関与の下での廃止措置及び放射性廃棄物の対応

- 今後本格化が見込まれる原発の廃止措置に必要な体制整備
- 処分方法等が決まっていない放射性廃棄物の対応
- 国が前面に立った高レベル放射性廃棄物対応

⑦ 放射線・ラジオアイソトープ(RI)の利用の展開

- 「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」の取組（重要RIの国内製造・安定供給等）
- 社会基盤維持・向上等に貢献しているという認知拡大及び工業等の様々な分野における利用の可能性拡大

⑧ イノベーションの創出に向けた取組

- 民間企業の活力発揮に資するなど成果を社会に還元する研究開発機関の役割
- 原子力イノベーションに向けた強力な国の支援
- サプライチェーン・技術基盤の維持・強化、多様化

⑨ 人材育成の強化

- 異分野・異文化の多種多様な人材交流・連携
- 産業界のニーズに応じた産学官の人材育成体制拡充
- 若手・女性、専門分野を問わず人材の多様性確保/次世代教育

原子力を巡る政策的な動き

● 令和5年2月10日「GX実現に向けた基本方針」の閣議決定

- 「原子力の活用」として長期運転、次世代各針路への建て替えの具体化、核燃料サイクル推進、廃炉の仕組みの整備、最終処分の実現に受けた働きかけの強化等を明記

● 令和5年2月20日「原子力利用に関する基本的考え方」原子力委員会改定（28日に閣議尊重決定）

- 原子力政策の長期的な方向性を示す羅針盤として、原子力委員会が約一年をかけて50名以上の有識者からヒアリングを行い、検討を重ねた。
- エネルギー利用のみならず非エネルギー利用の重要性等も明記。

● 令和5年4月28日「今後の原子力政策の方向性と行動指針」原子力関係閣僚会議決定

- 「第六次エネルギー基本計画」、「原子力利用に関する基本的考え方」に則り、GX実行会議における議論等を踏まえ、今後の原子力政策の主要な課題、その解決に向けた対応の方向性、関係者による行動の指針を整理する。
- ①再稼働への総力結集、②既設炉の最大限活用、次世代革新炉の開発・建設、④バックエンドプロセス加速化、⑤サプライチェーンの維持・強化、⑥国際的な共通課題の解決への貢献

● 令和5年5月末「GX脱炭素電源法（脱炭素社会の実現に向けた電気供給体制の確立を図るための電気事業法等の一部を改正する法律）」成立

- ロシアのウクライナ侵略に起因する国際エネルギー市場の混乱に加え、カーボンニュートラル実現の必要性の高まり。
- 原子力については、安全確保を大前提に、原子力発電の運転期間に関する規律の整備（電気事業法）及び、高経年化した原子炉に対する規制の厳格化（炉規法）を実施。
- 合わせて、原子力基本法を改正し、原子力利用に当たっての基本原則は法令等で明確化。（また、円滑かつ着実な廃炉の推進に向けて再処理法を改正。）

原子力発電所の現状

2024年1月24日時点

再稼働

12基

稼働中 10基、停止中 2基 (送電再開日)

設置変更許可

5基

(許可日)

新規制基準
審査中

10基

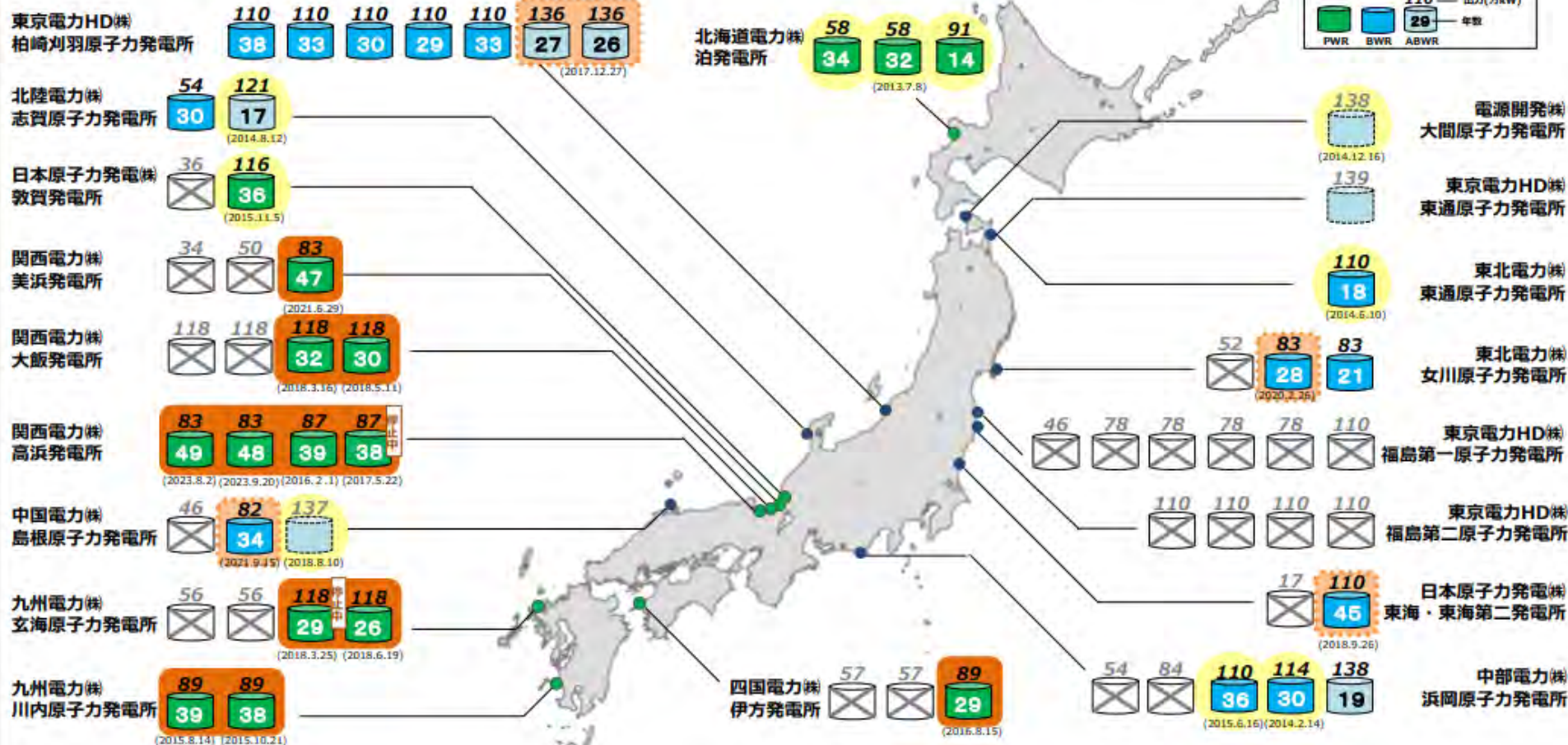
(申請日)

未申請

9基

廃炉

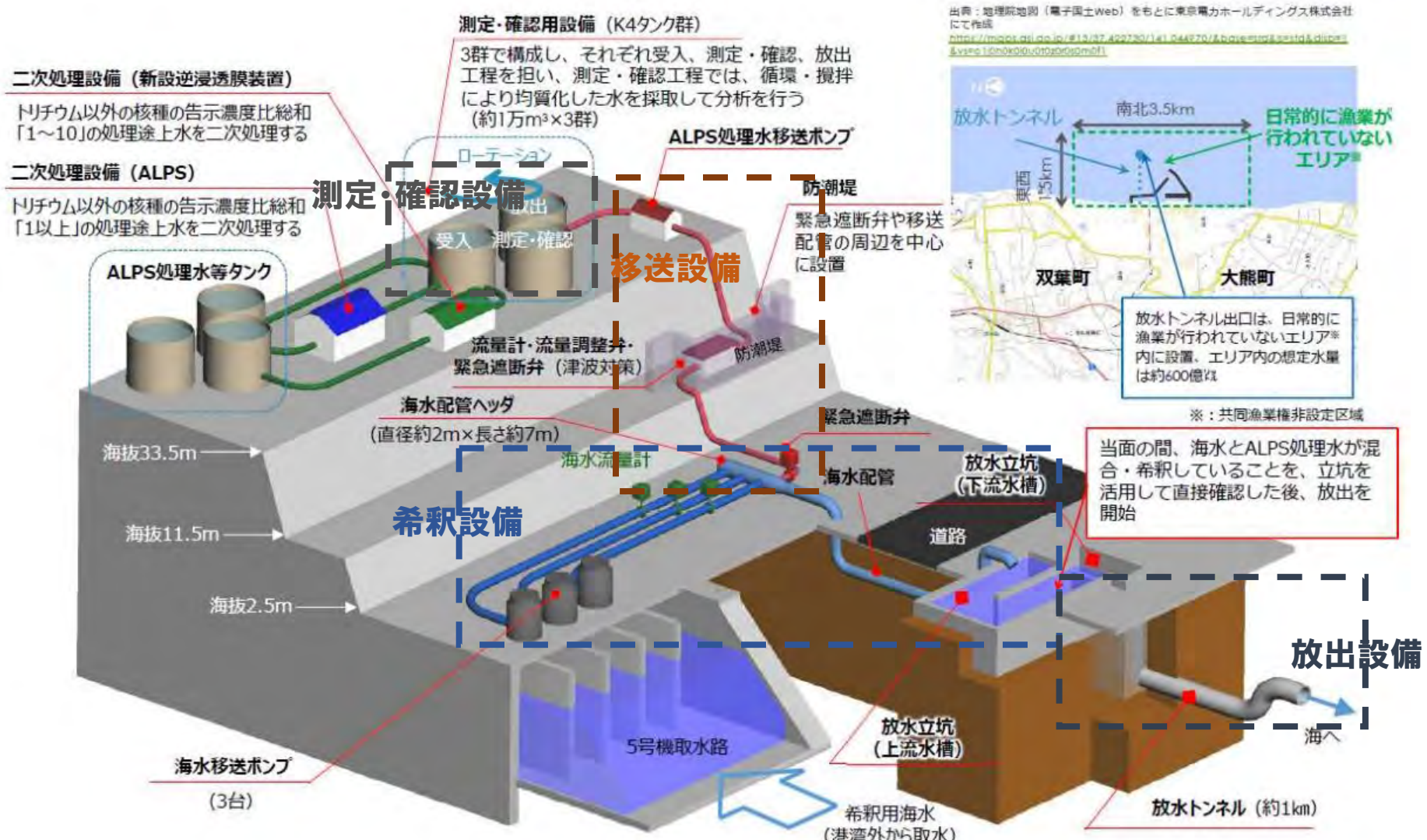
24基



(出典)資源エネルギー庁HP

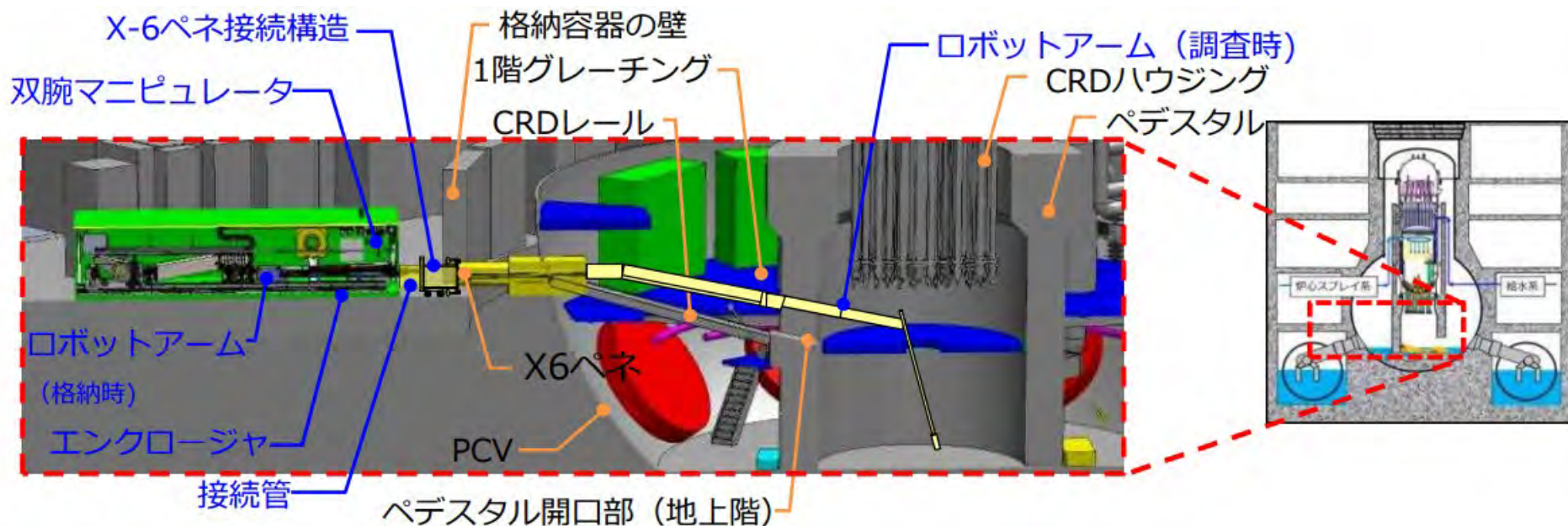
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pdf/001_02_001.pdf

ALPS処理水放出システム



出典) 東京電力ホールディング、「多核種除去設備等処理水の取扱いに関する 海域モニタリングの状況について」
2022年5月、[3-1-3.pdf \(meti.go.jp\)](https://www.meti.go.jp/ja/safety/3-1-3.pdf)

圧力容器内部調査及び試験的取り出し計画概要



- 2号機においては、PCV内部調査及び試験的取り出し作業の準備段階として、作業上の安全対策及び汚染拡大防止を目的として、今回使用する格納容器貫通孔（以下、X-6ペネ）に下記設備を設置する計画
 - X-6ペネハッチ開放にあたり、PCVとの隔離を行うための作業用の部屋（隔離部屋）
 - PCV内側と外側を隔離する機能を持つ X-6ペネ接続構造
 - 遮へい機能を持つ 接続管
 - ロボットアームを内蔵する金属製の箱（以下、エンクロージャ）
- 上記設備を設置した後、アーム型装置をX-6ペネからPCV内に進入させ、PCV内障害物の除去作業を行いつつ、内部調査や試験的取り出しを進める計画

志賀発電所の状況

トラブル等の発生箇所	トラブル等の事例
変圧器	絶縁油漏れ
外部電源	5回線中2回線が使用不可
絶縁油	前面海域に流出
非常用ディーゼル発電機	試運転中に自動停止
津波	約3mの水位上昇
物揚場埋立部コンクリート舗装 エクspansionジョイント シールカバー	地盤沈下、傾き、落下物
低圧タービン	伸び差大警報発生
使用済燃料貯蔵プール	プール水の飛散
冷却水、補給水	水位低下



- 外部電源は5回線のうち3回線が受電可能(必要な所内電源は外部電源1回線で供給可能)。
- 使用済燃料プールの冷却も維持しており安全確保に問題は生じていない。
- 外部電源が使用できない場合の非常用電源として非常用ディーゼル発電機、さらには、これらのバックアップ電源として、大容量電源車および高圧電源車も複数台確保。
- 変圧器・外部電源以外の被害箇所は、おおむね復旧完了あるいは応急処置済みであり、来年度中を目処に段階的に復旧を進める。

出典) 北陸電力、「志賀原子力発電所の現況、2024年1月31日現在」

https://www.rikuden.co.jp/business_areas/index.html

IAEAのウクライナへの対応①

IAEAグロッシ事務局長は2022年3月、ウクライナ情勢の安全、セキュリティ、保障措置への影響を議論するために開催されたIAEA理事会において、原子力安全とセキュリティの不可欠な7つの柱について説明した。また、これらの7つの柱を念頭に置きつつ、IAEAのはウクライナやロシアの指導部と協議を重ね、原子力事故を未然に防ぎ、原発の健全性を確保するため、ZNPPの原子力安全・安心を確保するための具体的な原則（5つの基本原則）を提唱。この原則は2023年5月30日に国連安全保障理事会で採択された。

原子力安全・セキュリティの7つの柱

1. 原子炉、燃料貯蔵庫、放射性廃棄物貯蔵庫など、施設の物理的完全性を維持する必要がある。
2. すべての安全およびセキュリティシステムおよび機器は、常に完全に機能する必要がある。
3. 運営スタッフは、安全とセキュリティの義務を果たすことができ、過度のプレッシャーのない決定を下す能力を持っている必要がある。
4. すべての原子力施設には、送電網からの安全なオフサイト電力供給が必要である。
5. 途切れることのない物流サプライチェーンと、現場への往復の輸送が必要である。
6. 効果的なオンサイトおよびオフサイトの放射線モニタリングシステム、および緊急事態への備えと対応措置が必要である。
7. 規制当局などとの信頼できるコミュニケーションが必要である。



原発事故を未然に防ぐために必要な5つの基本原則

1. 特に原子炉、使用済み燃料貯蔵庫、その他の重要なインフラ、または人員を標的とした、原発からの、または原発に対するいかなる種類の攻撃もあってはならない。
2. ZNPPは、重火器(多連装ロケットランチャー、大砲システム、弾薬、戦車など)や、原発からの攻撃に利用される可能性のある軍人の保管や基地として使用してはならない。
3. 発電所へのオフサイト電源を危険にさらすべきではありません。そのために、オフサイト電源が常に利用可能で安全であることを保証するためにあらゆる努力を払わなければならない。
4. ZNPPの安全で確実な運用に不可欠なすべての構造、システム、およびコンポーネントは、攻撃または妨害行為から保護されるべきである。
5. これらの原則を損なうような行動はとられるべきではない。

IAEAのウクライナへの対応②

ウクライナに対するIAEAの取組

IAEAのラファエル・グロッシ事務局長は、これまでに複数回ウクライナを訪問するとともに、IAEAザポリージャ支援／調査ミッション (ISAMZ:the IAEA mission to Ukraine, the IAEA Support and Assistance Mission to Zaporizhzhya)を派遣するなど、ザポリッジャ原子力発電所をはじめとしたウクライナの原子力安全・セキュリティ支援を実施。

【グロッシ事務局長のウクライナ訪問】

2022年3月にウクライナを訪問し、原子力安全・セキュリティ支援を開始。

2022年4月、グロッシ事務局長はキーウでの会合で、ゼレンスキー大統領に対し、IAEAがウクライナの原子力施設の安全・セキュリティ確保に向けて支援を継続することを伝達。

2022年8月、グロッシ事務局長支援チームはザポリッジャ原子力発電所を訪問。

2022年10月、グロッシ事務局長はゼレンスキー大統領及びプーチン大統領と相次いで会談し、ウクライナの原発事故防止に協力するよう要請した。また、ZNPPの安全・セキュリティ保護地帯の設置を求めた。

2023年1月 グロッシ事務局長はゼレンスキー大統領と会談し、深刻化する原子力安全・核セキュリティへの懸念について議論。

2024年2月 グロッシ事務局長はゼレンスキー大統領と会談するとともに、4回目のザポリッジャ原子力発電所訪問し、原発の安全性に不可欠な現在の電源や冷却システムの状況等の評価を実施。



【グロッシ事務局長のロシア訪問】

2022年10月 サンクトペテルブルグにてプーチン大統領と会談し、IAEAの提案する原子力安全・核セキュリティ保護区域の設定について協議。

2024年3月 ソチにて、プーチン大統領と会談し、特にザポリッジャ原子力発電所における重大な原子力安全とセキュリティのリスクを軽減することが最も重要であることが議論の焦点となった。



【IAEA理事会・総会決議 等】

2022年3月理事会 ロシアの侵略が、保障措置検証活動の実施を妨げていることに重大な懸念を表明

2022年9月理事会 ウクライナの核施設に対するすべての行動を直ちに停止するよう表明

2022年9月総会 平和目的の原子力施設及びその周辺における攻撃や脅威を控え、保障措置活動の確実がなされるよう表明

2022年11月理事会 先の理事会の要請を、ロシアが行っていないことに重大な懸念を表明

2023年

【ウクライナへの物資支援】

2023年2月までに10回にわたり、物資支援を実施

(出展) IAEAHPを基に講演者作成。写真、図はIAEA HP掲載

<https://www.iaea.org/nuclear-safety-security-and-safeguards-in-ukraine?page=1>

<https://www.iaea.org/sites/default/files/23/02/nuclear-safety-security-and-safeguards-in-ukraine-feb-2023.pdf>

IAEA総会及び総会期間中におけるバイ会談

上坂原子力委員会委員長によるバイ会談等について

2022年総会時

◆ IAEA グロッシェ事務局長

日IAEA関係の強化に向けた具体的方策、東京電力福島第一原子力発電所の廃炉やALPS処理水の取扱いに係る協力、ウクライナ情勢に係るIAEAの取組と日本の支援等について意見交換を実施。

また、あわせて、以下の各国原子力関係者と、両国の原子力政策の現況について意見交換を実施し、両国の協力関係の強化について一致。医療用RIアクションプランについても紹介し、意見交換を実施。

◆ 仏国 ジャック原子力・代替エネルギー長官

◆ 米国 フルービー国家核安全保障庁長官

◆ 独国 ティドウ環境・自然保護・原子力安全・消費者保護事務次官

◆ 英国 ヘファービジネス・エネルギー・産業戦略省原子力・インフラ・廃炉局長

◆ アルゼンチン セルキス国家原子力委員会委員長



上坂原子力委員長とIAEAグロッシェ事務局長



上坂委員長と英国 ボウエネルギー安全保障・ネットゼロ省担当大臣

2023年総会時

◆ 英国 ボウエネルギー安全保障・ネットゼロ省担当大臣

・上坂委員長より日本のALPS処理水放出への支持の感謝等について言及するとともに、日本の原子力政策の現況について説明。

・上坂委員長とボウ大臣との間で、東電福島原子力発電所の廃炉や高温ガス炉、医療用ラジオアイソトープ等、日英の原子力協力の強化について意見交換を行った。

◆ IAEA原子力科学・応用局 モクタール事務次長

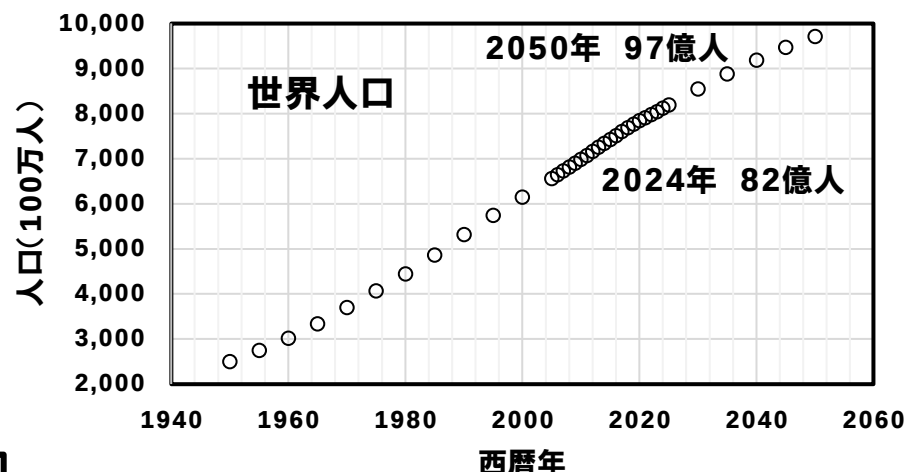
・上坂委員長より、日本の医療用ラジオアイソトープに関する取組等について紹介するとともに、モクタール事務次長との間でIAEAとの連携強化について意見交換を行った。



上坂委員長とIAEA原子力科学・応用局 モクタール事務次長ら

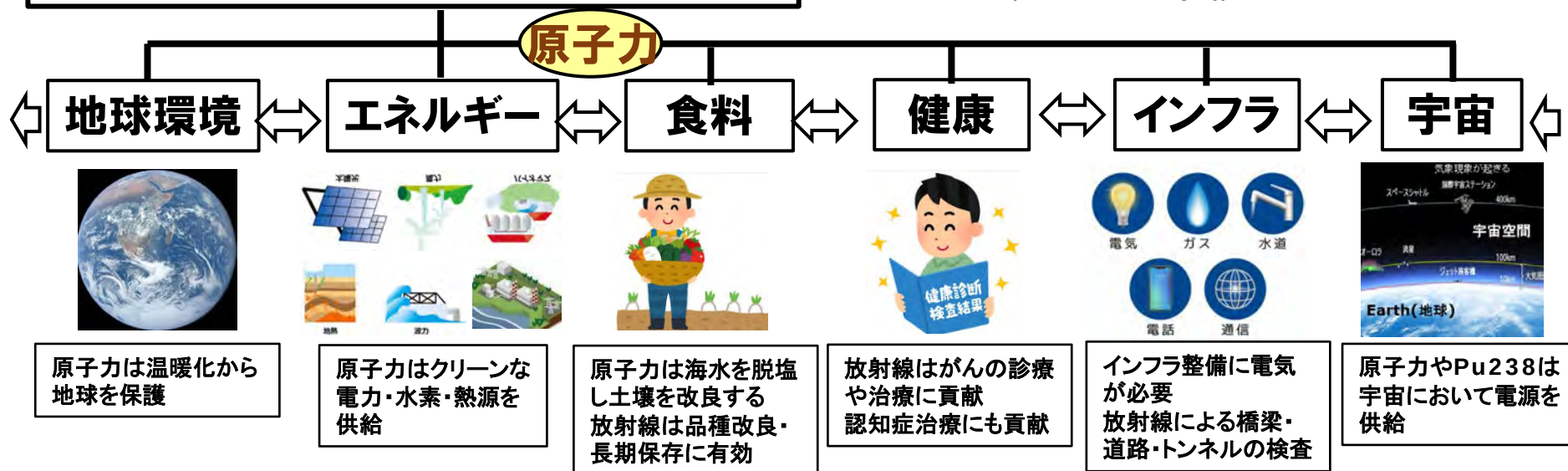
人類の持続可能性と原子力

- 2060年頃にピークに達して以降は減少傾向
- 世界人口に占める割合
先進国: 13%
開発途上国: 87%
- 一人あたりのエネルギー消費量
資源国と先進国が多く、開発途上国は少なく、不平等である。
食物消費も同様の傾向と推察。



Ref. 総務省統計局 世界の統計2023
<https://www.stat.go.jp/data/sekai/0116.html>

人類の持続可能性に必要なもの



原子力は地球を癒し自然災害を少なくすることにより人類を守る。クリーンなエネルギーと豊富な食料を人類に与える。放射線はがんを発見・治療して人類の死の恐怖を取り除く。放射線はインフラの劣化を未然に防ぎ、半導体素材を人類に提供する。宇宙空間開拓は地球環境や人類の生活を向上させる。

エネルギーの安定供給(長期ビジョン)

長期のエネルギー安定供給のための条件とは

- 地球環境と調和すること
(CO₂を出さないエネルギーシステムであること)
- 燃料資源が豊富にあること
- 安全性・経済性に優れていること
- 安定電源であること



再生可能エネルギーや原子力が候補となるが、総合的に見れば「原子力」を選択することになる
(その理由は皆さんで議論してください)

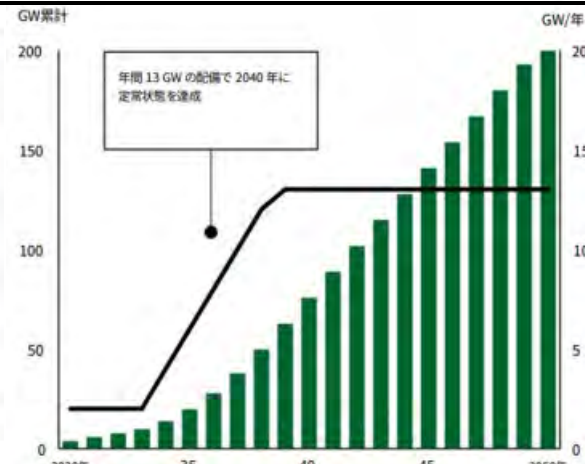
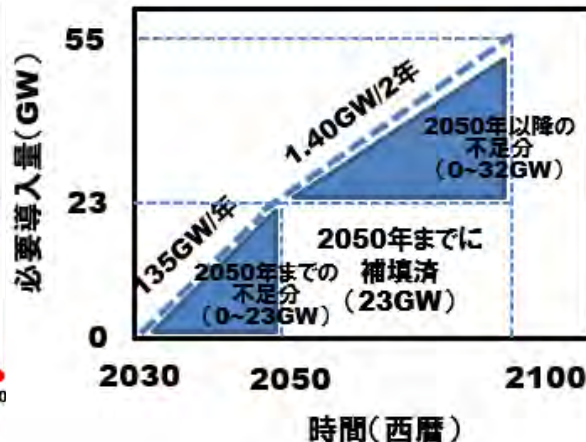
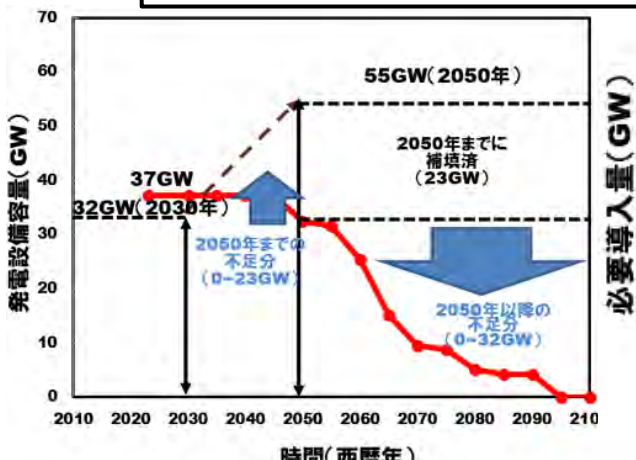
各原子炉型とその特徴

炉型	特徴
軽水炉	世界中で多く利用、使用済燃料の処理・処分60年運転が可能、圧力容器の照射健全性
高速炉	核エネルギー利用の理想型、経済性がネック プルトニウムを利用(核拡散の問題)
高温ガス炉	高温の熱利用が可能、核燃料サイクルがネック 化学コンビナートのある工業地帯の立地
SMR	スケールメリットがなく経済性がネック 資本費や安く建設が容易、石炭火力の代替
マイクロ炉	高度な設計が必要

原子力の設備容量の見通し予測(COP-28では現状規模の3倍を目指す:米国提案)

日本の想定(2030年32GW、2050年55GW)

米国の想定(現在100GW、2050年300GW)



内 容

1. 原子力政策

2. 人材育成

- ・ 厳しい専門教育
- ・ 夢のある自由な研究

3. まとめ

国際原子力人材イニシアティブ事業

事業の背景・概要

- 令和2年度から、我が国全体として原子力分野の人材育成機能を維持・充実していくことを重視し、**複数の機関が連携してコンソーシアムを形成**し、共通基盤的な教育機能を補い合う中長期的（7年間）な取組を開始。
- 令和3年度より、全国の関係機関が参加するコンソーシアム（未来社会に向けた先進的原子力教育コンソーシアム（Advanced Nuclear Education Consortium for the Future Society : **ANEC**）を創設。

事業の体制・支援内容

令和5年度予算額：223百万円

（令和4年度予算額：223百万円）

- 国内大学・大学院、研究機関を対象として、複数の機関が連携してコンソーシアムを形成し、我が国の原子力分野の人材育成機能の維持・強化を図る。

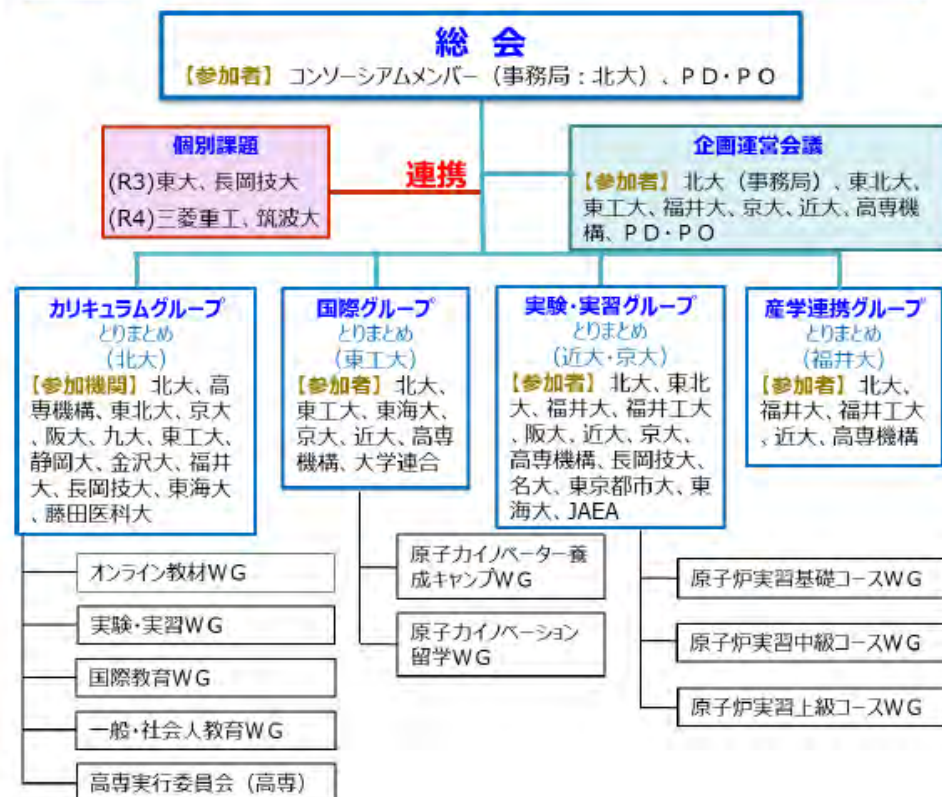
【カリキュラムG】体系的な専門教育カリキュラム、オンライン教材の作成

【国際G】原子力イノベーター養成キャンプ、原子力イノベーション留学の実施

【実験・実習G】原子炉実習基礎・中級・上級、廃棄物計測・信頼性工学実習、発電炉シミュレータ実習を実施

【産学連携G】原子力施設インターンシップ研修、原子力業界探求セミナー、電力会社実習を実施

事業体制図



日本と欧州の原子力の教育と研究

		日本	欧米
小中高		講義	広い教養教育
		受験(勉学のPeak)	
学部		講義	厳しい講義
大学 院	修士	(一般) 講義・研究(Peak)	厳しい講義 (勉学のPeak)
	博士	講義・研究 (最近学生減)	研究(Peak)

類似性

IAEA原子力エネルギーマネジメントスクール
(原子力人材育成ネットワーク運営)
マネジメント・国際性・ネットワーク作り

主要大学毎のトップマネジメントスクール
マネジメント・国際性・ネットワーク作り

原子炉主任技術者・核燃料取扱主任者（国家資格）の学科試験免除が修了要件の社会人対象
定員: 15名（電力・メーカー・研究所等）
日本原子力研究開発機構等産官学連携

15科目の教科書（オーム社・Springer）と
e-learningシステム（IAEA）



原子炉主任技術者合格実績

Fiscal	Total	UT-NPS	%
2006	21	7	33
2007	18	4	22
2008	19	10	53
2009	22	9	41
2010	23	6	26
2011	19	12	63
2012	20	5	25
2013	26	8	31
2014	19	6	32
2015	12	5	42
2016	11	4	36
2017	12	6	50
2018	26	7	27
2019	17	3	18
2020	25	18	68

核燃料取扱主任者合格実績

Fiscal	Total	UT-NPS	%
2006	40	13	33
2007	27	12	44
2008	29	12	41
2009	17	14	82
2010	11	9	82
2011	24	14	58
2012	16	14	88
2013	13	7	54
2014	22	17	77
2015	23	14	61
2016	25	11	44
2017	17	8	47
2018	25	13	52
2019	27	13	48
2020	18	12	67

技術士資格とコンピテンシー*

技術士に求められる資質能力(コンピテンシー)

2023年1月 科学技術・学術審議会 技術士分科会改訂

- ・グローバル化、高度化、多様化→**国際的同等性**(国際エンジニアリング連合の定義を参照)
- ・遅くとも**35歳程度**の技術者が、技術士資格を取得して活躍すると想定
- ・**実務経験**に基づく**専門的学識**、高等の**専門的応用能力**
- ・豊かな**創造性**を持って、**複合的な問題**を解決する能力

技術士**第一次試験**:誰でも受験可 **マークシート方式** → 合格者は「修習技術者」/「技術士補」

技術士**第二次試験**:第一次試験合格+実務経験が必要

- ・ **厳しい筆記試験+口答試験の難関** → 合格者は技術士登録を経て「技術士」を名乗れる



問われるコンピテンシー:**専門的学識**、問題解決、マネジメント、評価、コミュニケーション、リーダーシップ、**技術者倫理**、継続研鑽の7項目 → **赤字**関連の内容は一次試験から問われる

原子力・放射線部門:

- ・**一次試験**:**原子力/放射線/エネルギーの全般**にわたる専門科目
+ 倫理などを問う適性科目 + 科学技術全般にわたる基礎科目
- ・**二次試験**:①原子炉システム、②核燃料サイクル・廃棄物、③放射線利用・防護から選択

原子力・放射線部門の**一次試験**は、大学**専門課程**～大学院**修士課程修了者のレベル**にほぼ合致

* <https://www.engineer.or.jp/contents/attach/competency.pdf>

内 容

1. 原子力政策

2. 人材育成

- ・ 厳しい専門教育
- ・ 夢のある自由な研究

3. まとめ

医療利用される代表的なRI

○ RIは、これまで医療診断用として幅広く活用されてきたが、これに加え、近年、治療用RI医薬品の開発が急速に進展。

核医学画像診断

【PET用(※1)】

炭素11, 窒素13, 酸素15, フッ素18

【SPECT用(※2)】

ガリウム67, クリプトン89m, **モリブデン99**, **テクネチウム99m**, インジウム111,
ヨウ素123, タリウム201

(※1)PET: positron emission tomographyの略。陽電子放出断層撮像法。

(※2)SPECT: single photon emission computed tomographyの略。単光子放出断層撮像法。

核医学治療

【現在承認されている核種】

イットリウム90, ヨウ素131, ラジウム223, **ルテチウム177(2021.6.21承認、2021.9.21販売開始)**

【今後期待されている核種】

銅64, **アスタチン211**, **アクチニウム225**, …

富士フイルム富山化学、放射性医薬品「ルタテラ静注」で製造販売承認を取得

神経内分泌腫瘍は、ホルモンやペプチドを分泌する神経内分泌細胞に由来する腫瘍で、全身のさまざまな臓器、なかでも膵臓、消化管および肺に多く発生します。選択できる薬物療法が限られていることから、アンメットメディカルニーズの高い疾患とされています。

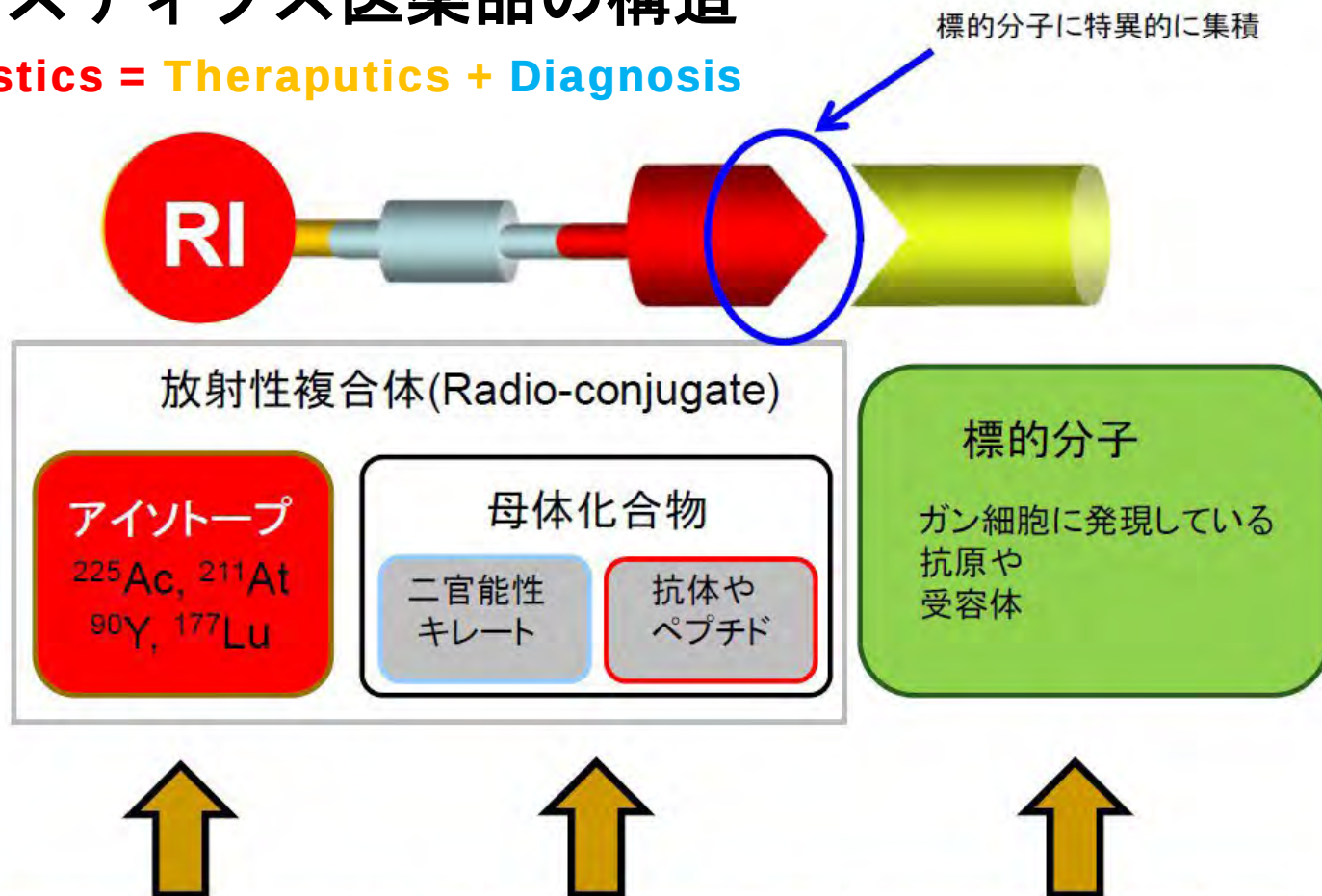
(中略)今回承認された「ルタテラ」は、ソマトスタチン類似物質に放射性同位元素のルテチウム177を標識した治療用放射性医薬品です。神経内分泌腫瘍に高率で発現するソマトスタチン受容体に結合し、ルテチウム177から放出される放射線ががん細胞を直接攻撃します。

※富士フイルム富山化学プレスリリースより抜粋



セラノスティクス医薬品の構造

Theranostics = Therapeutics + Diagnosis

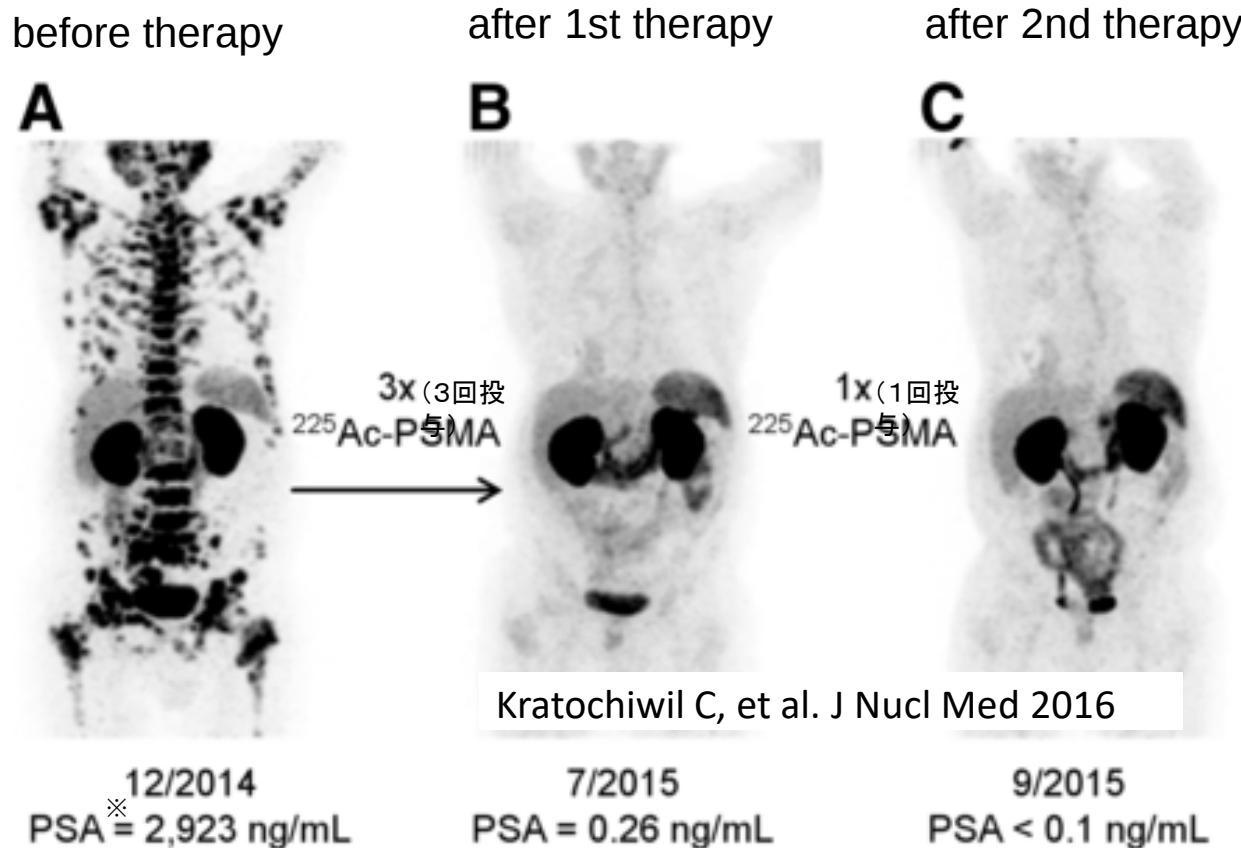


課題	製造・分離(入手性)	薬剤開発、動態評価	治療戦略、法整備
分野	原子力 放射化学	有機合成、 放射性薬品学	核医学、医学物理、 安全管理

α 線放出核種による治療例

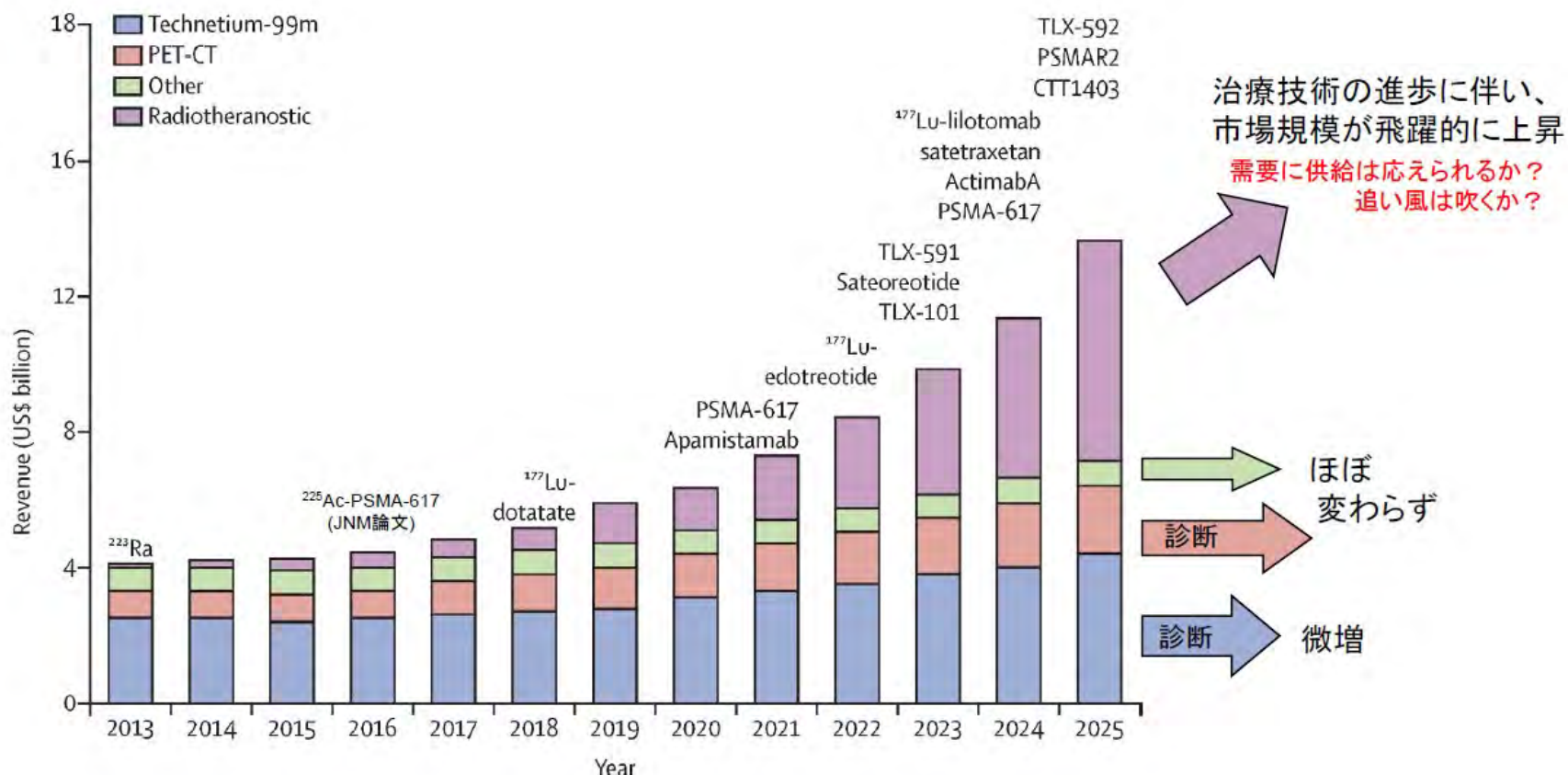
- 2016年、骨転移が全身に広がった転移性前立腺がんに対しアクチニウム225標識PSMA※-617中分子製剤を投与したところ、転移がんが消失した旨の報告があったことを契機に、アクチニウム225は注目を集めている。
- 以降、欧州や南アフリカなどから関連研究が相次いでおり、既に多くの臨床試験が開始。

※Prostate Specific Membrane Antigen(前立腺特異的膜抗原)



※Prostate Specific Antigen(前立腺特異抗原)

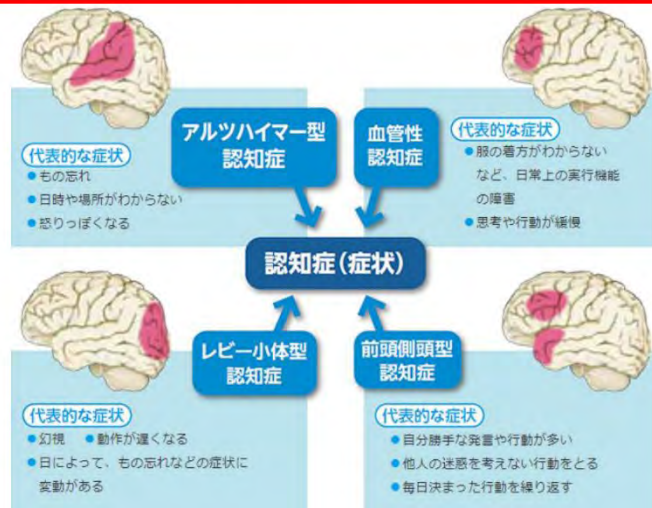
放射性セラノスティックスの市場予測



令和3年4月6日（火）第11回原子力委員会定例会議資料 資料1

Herrmann K, Schwaiger M, Lewis JS, Solomon SB, McNeil BJ, Baumann M, Gambhir SS, Hricak H, Weissleder R. Radiotheranostics: a roadmap for future development. Lancet Oncol. 2020 Mar;21(3):e146-e156.
Paul-Emmanuel Goethals and Richard Zimmermann (Nuclear Medicine MEDraysiaintell Report & Directory, July 2019)

脳血流低下部位による症状



日本メジフィジックス社HPより抜粋

核医学検査の装置

SPECT/CT装置（脳血流）
（シンチグラフィ、ガンマカメラ）



PET/CT装置（アミロイドPET）

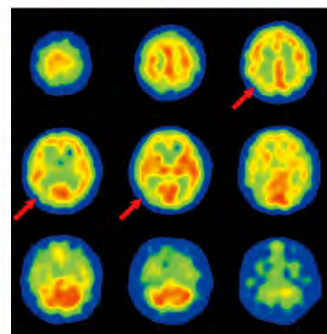
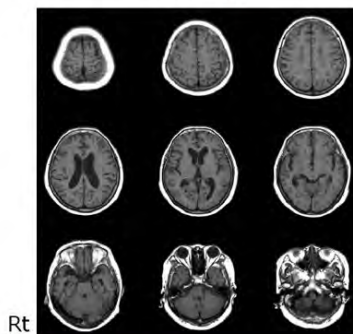


脳血流SPECTは、局所脳循環の機能的情報を提供できる診断法

紹介した症例は臨床症例の一部を紹介したもので、全ての症例が同様な結果を示すわけではありません。

MR画像

¹²³I-IMP SPECT画像



MR画像では
脳の萎縮は目立ちませんが...

脳血流SPECT画像では
側頭・頭頂部の（→）の血流が
低下しています。

60歳台後半の女性。1年ほど前よりもの忘れが目立つことに夫が気づいた。同じことを何度も言ったり、探し物をしてることが多くなってきた。

MMSE : 20/30
ADAS : 19/70
MRI : 軽度の脳萎縮を認める。
SPECT : 側頭頭頂部の血流が低下している。

アルツハイマー型認知症治療

- ・レカネマブ（製品名：レケンビ®点滴静注）2023年9月25日承認
- ・効能・効果：
アルツハイマー病による軽度認知障害及び軽度の認知症の進行抑制

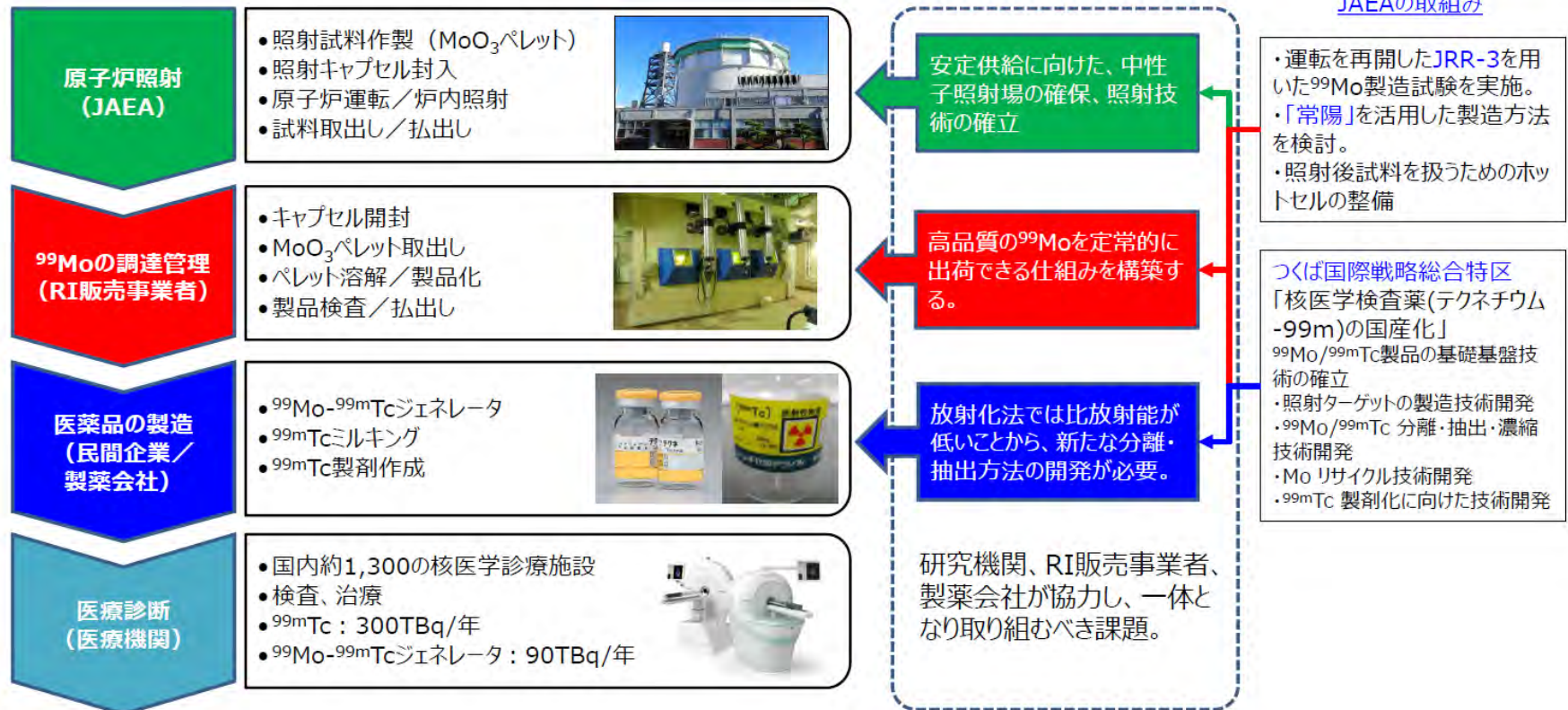


エーザイ Biogen社

モリブデン99国内製造に向けた取組

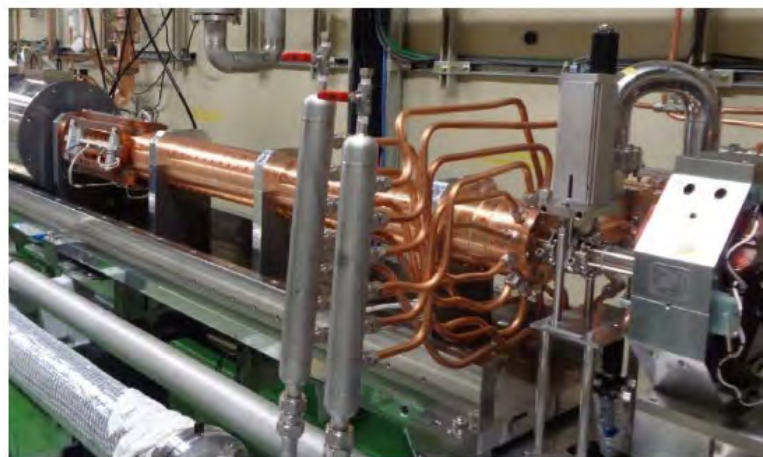
- 本年2月に運転を再開し、本年7月に施設供用運転を開始した日本原子力研究開発機構（JAEA）の試験研究炉「JRR-3」を用いることで、国内需要の20-30%を製造できる可能性。
- また、日本メジフィジックス（放射性医薬品メーカー）においても、2023年から加速器を用いて生産すること目指している。

JAEAにおけるモリブデン99/テクネチウム99m国内安定供給のフロー



日本メジフィジックスで ^{99}Mo の生産開始

- 日本メジフィジックスでは $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 製剤の主原料となる ^{99}Mo の自社内での試製造を2023年9月に開始した。
- ^{99}Mo の製造方法は ^{100}Mo を出発物質として電子ライナックを用いて製造する。核反応式は、 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ である。
- 2025年度に商業生産開始を目標としている。
(国内需要の20-30%の比率を確保を目指している。)
- 日本メジフィジックスは海外から ^{99}Mo を輸入し $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 製剤の製造、医療機関への販売までを一貫して実施している。
- 今回、原料となる ^{100}Mo のみを輸入すれば国内での ^{99}Mo の製造、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 製剤供給が可能となる。



日本メジフィジックス千葉工場内に設置された電子ライナック

出典) News Release, 日本メジフィジックス株式会社、「自社生産モリブデン-99、試製造開始」、2023年9月21日
https://www.nmp.co.jp/sites/default/files/2023-09/20230921_NewsRelease.pdf

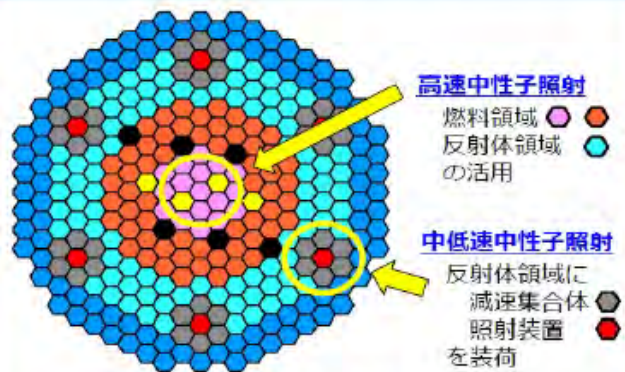
革新的がん治療に使用されるAc-225

- 多くの症例に対し、短半減期アルファ線放出核種による治療効果が確認されているが、**特にAc-225の治療効果が高く、世界で治験・臨床研究の競争が激化。**
- しかしながら、Ac-225は全世界的に供給不足。米、欧、カナダ等が相次いで加速器を用いた製造計画を発表。
- 日本では研究に必要なAc-225の確保が十分ではなく、治験の円滑な実施や将来の必要量確保の観点から、加速器での製造に加えて**「常陽」を活用した大量製造に大きな期待**が寄せられている。

(参考) 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (令和 3 年 6 月 18 日)

「常陽」においては、世界的にも希少な医療用放射性同位体を大量製造することが可能である。「常陽」の再稼働を進めていくことで、先進的ながん治療等への貢献が期待される。

- **「常陽」の新規制基準への早期適合・早期運転再開**及びそのための**リソース確保**が課題。

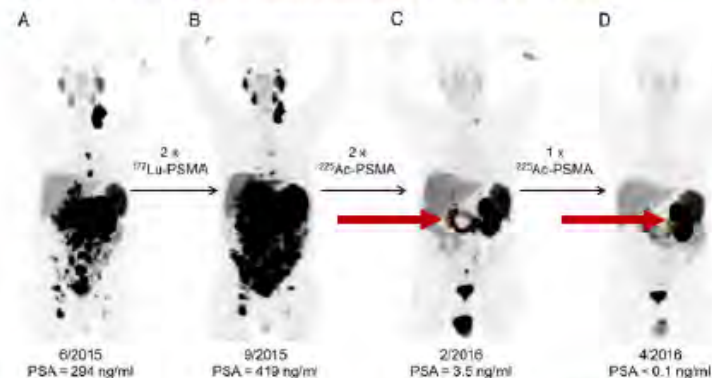


Ra-226やTh-230を親元素としたAc-225の製造

Mo-98を親元素としたMo-99の製造

多様な中性子照射場

末期の転移性前立腺ガンに対して効果



Kratochwil, Giese, JNM, July 7, 2016



昭和52年	初臨界
平成19年	定期検査中の破損により、燃料を交換することができなくなる事象が発生
平成27年	燃料交換機能の復旧
平成29年	原子力規制委員会に対し、新規規制基準に係る設置変更許可を申請

仕様	
目的	高速炉研究開発、R I 製造※ 等
最大熱出力	10万キロワット

※今後目的変更を申請予定
運転再開予定：令和6年度末～

世界的に注目の次世代α線放出核種 (^{225}Ac) の製造研究

Ra-226: 半減期1600年
Ac-225: 半減期10日

- ^{225}Ac は現行のジェネレータ製造は供給不足
- ^{225}Ac の別法による製造開発競争が世界的激化
- 加速器による製造法に注目：原材料 (^{226}Ra)
- ^{226}Ra (かつて密封小線源、廃棄物扱い)

加速器による ^{225}Ac 製造・供給： 製造法③
QST が国内初の試験製造に成功

$^{226}\text{Ra}(p, 2n)^{225}\text{Ac}$

$^{226}\text{Ra} \rightarrow \text{プロトン照射}(p, 2n) \rightarrow ^{225}\text{Ac}$



廃棄物の ^{226}Ra を精製し、
加速器用のターゲットに加工

多くの困難を克服

- 限られた放射性廃棄物入手
- ターゲットも製品もαエミッター
- ^{226}Ra の精製、ターゲット作成：
汚染のリスク、ラドンのコントロール
- 照射時の熱処理、被ばく対応
- 照射後に副生成物（異核種）を
除去し、 ^{225}Ac を精製



国内でのAc-225の製造
本格化に期待

Nagatsu, Suzuki, et al. Eur J Nucl Med Mol Imaging 2021

日本メジフィックス、「セラノスティクス」の早期実現に向け千葉事業所内に「CRADLE (クレイドル) 棟」建設着工

AMED 平成29年度事業「医療研究開発革新基盤創成事業 (CiCLE)」
「セラノスティクス概念を具現化するための創薬拠点整備を伴う、
抗体等標識治療薬 (アルファ線) とコンパニオン診断薬の開発」

日本メジフィックス (株) は、放射線を利用した「治療と診断の融合 (セラノスティクス)」実現のため、放射線の一種であるアルファ線¹⁾を放出するラジオアイソトープ (RI: 放射性同位元素) を用いた治療薬とコンパニオン診断薬²⁾の同時開発を目指している。同社ではこの研究開発課題を「プロジェクト-CRADLE (Consortium for Radiolabeled Drug Leadership)」とし、新薬開発へ向けて全社を挙げて取り組んでいる。同社は、プロジェクトCRADLEを推進していく創薬拠点「CRADLE (クレイドル) 棟」の建設に着手した。

名称: 「CRADLE棟」

開設地: 千葉県袖ヶ浦市北畑3-1 日本メジフィックス千葉事業所内

規模: 建築面積 約980m² 延床面積 約1900m² (構造: 1階RC造 2階鉄骨造)



CiCLE
Life sciences for tomorrow's patients

創薬拠点「CRADLE 棟」の建設
開設地: 千葉県袖ヶ浦市
竣工時期: 2019 年 9 月
総投資額: 33 億円

電子線形加速器を利用した医療用RIの製造(II)

【医療用RIの製造方法】

- 原子炉及び加速器(主としてサイクロトロン)を利用する。
- **電子線形加速器**を用いて加速した電子をタングステン等の重金属に照射することにより生成する**制動放射線**を光子として用いることで、新たな核種を製造することが可能となる。

【電子ライナックを利用した医療用RIの製造につ

医療用核種	^{225}Ac (α 線治療、TAT: Targeted Alpha Therapy)
核反応	$^{226}\text{Ra} (\gamma, n) ^{225}\text{Ra} \xrightarrow{\text{B-decay}} ^{225}\text{Ac}$
実施場所	東北大学電子光理学研究センター
試験結果	加速電圧33.3MeV, 電流138.8 μA , 6時間で234.2Bq
実機システム解析	(加速エネルギー35MeV, 電流1mA, ^{226}Ra 43g) PHITS (Particle and Heavy Ion Transport Code)

・エネルギー依存性試験。

→ 反応断面積の理論計算値を用いたシミュレーション値との比較。

・分離精製によるAc-225回収率の測定。

→ 不純物核種の評価と最終的に回収可能なAc-225量の評価。

・スケールアップ試験を計画。

→ 基礎試験 (50kBq) の1,000倍のRa-226原料 (50MBq)

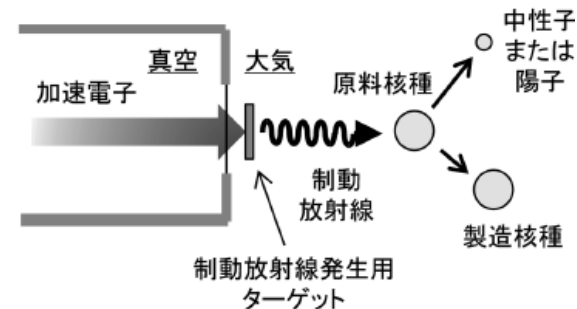


図 電子ライナックを利用したRI 製造方法概略図

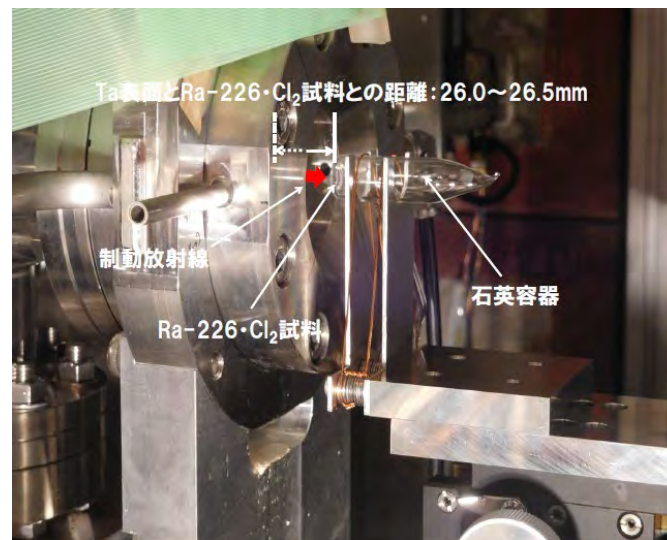
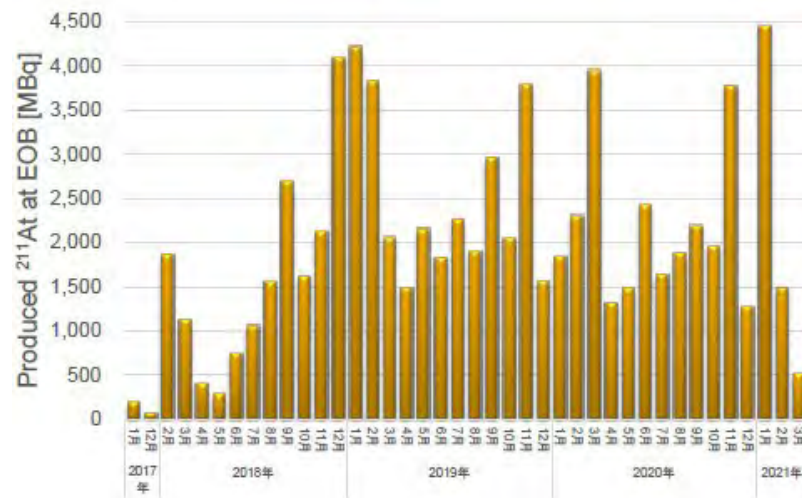


写真 Ac-225製造基礎試験の様子

^{211}At を安定的に製造可能な国内の施設

2018年現在, 国内でAt-211を安定的に製造可能な施設は量研機構(放医研、高崎研), 理化学研究所(仁科加速器センター), 大阪大学(核物理研究センター), 福島県立医大(先端臨床研究センター)のみである。



福島医大における ^{211}At 製造記録
録

出典 (1) 東 達也、「甲状腺癌に対する新しい核医学治療の将来展望」、日本内分泌・甲状腺外科学会雑誌、2018 年 35 巻 3 号 p. 196-199 https://doi.org/10.11226/jaesjsts.35.3_196

(2) 鷺山幸信、「加速器による α 線薬剤等の生成の現状と展望について」、原子力委員会定例会議資料、2021年4月6日

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

アクションプラン策定の経緯

2022年5月31日原子力委員会決定

核医学治療への期待

- ・「セラノスティクス」
(診断と治療を合わせて行う考え方やその手法)への注目の高まり

国内の動き・課題

- ・ラジオアイソトープの大量製造を可能とする研究炉の再稼働の動き
一方、
- ・核医学治療を行う病床数の不足
- ・ラジオアイソトープ製造・利用を推進する人材不足

海外の状況

- ・製造・研究に多額の投資
- ・研究炉・加速器のネットワーク形成を推進
- ・ラジオアイソトープ及びその原料について獲得競争の様相

最先端の原子力科学技術により医療体制を充実し、国民の福祉向上に貢献するとともに、
医療サービスの観点から経済安全保障の確保に寄与すべく、
国産ラジオアイソトープを患者のもとへ届けるためのアクションプランを策定

10年の間に実現すべき目標

- ① モリブデン-99/テクネチウム-99mの一部国産化による安定的な核医学診断体制の構築
- ② 国産ラジオアイソトープによる核医学治療の患者への提供
- ③ 核医学治療の医療現場での普及
- ④ 核医学分野を中心としたラジオアイソトープ関連分野を我が国の「強み」へ

アクションプラン

(1) 重要ラジオアイソトープの国内製造・安定供給のための取組推進

- ・JRR-3・加速器を用いたモリブデン-99/テクネチウム-99mの安定供給 (可能な限り2027年度末に国内需要の約3割を製造し、国内へ供給)
- ・「常陽」・加速器を用いたアクチニウム-225大量製造のための研究開発強化 (「常陽」において2026年度までに製造実証)
- ・アスタチン-211実用化に向けた取組強化 (2028年度を目途に医薬品としての有用性を示す) 等

(2) 医療現場でのアイソトープ利用促進に向けた制度・体制の整備

- ・核医学治療を行える病室の整備 (特別措置病室等) (核医学治療実施までの平均待機月数について、3.8か月 (2018年) → 平均2か月 (2030年))
- ・トリウム-227・ガリウム-68等、新たな放射性医薬品への対応 等

(3) ラジオアイソトープの国内製造に資する研究開発の推進

- ・研究炉・加速器による製造のための技術開発支援 ・福島国際研究教育機構による取組推進
- ・新たな核医学治療薬の活用促進に向けた制度・体制の整備 等

(4) ラジオアイソトープ製造・利用のための研究基盤や人材、ネットワークの強化

- ・人材育成の強化 (研究人材、医療現場における人材等) ・国産化を踏まえたサプライチェーン強化 ・廃棄物の処理・処分に係る仕組みの検討 等
- 科学技術・イノベーション政策、健康・医療政策、がん対策の観点からも重要であるため、関係する政府戦略の方向性とも軌を一にして取り組む

第66回IAEA総会における原子力委員会主催サイドイベント

タイトル

α線薬剤の開発とアイソトープの供給～アスタチン-211 (^{211}At) と国際機関の役割及びその可能性～
(The Development of Alpha-emitting radiopharmaceuticals and the Supply of the Isotopes:
 ^{211}At and the possible role of the international organization)

概要

- α線薬剤について、世界の注目を集める画期的な研究成果を発表した独・デュッセルドルフ大学のギーセル教授より基調講演を実施。
- IAEA幹部、米国欧州の製造・供給網の代表者、 ^{211}At の製造・研究開発について先進的な取組を推進している各国研究者が現状や課題、今後の期待について発表。
- 会議はオンラインとウィーン現地のハイブリッド形式で開催。各国・地域及び国際機関からオンラインで計約240名が参加（米、中、シンガポール、インドネシア、マレーシア、IAEA、OECD/NEA等）



上坂委員長による開会挨拶



会場の様子



IAEA物理化学部門 部長
メリッサ・デネケ氏によるスピーチ



欧州及び米国のAt-211製造・供給網の代表者
ナント大学ジャスティン博士、DOEバルキン博士

OECD/NEA 医療用RI供給に関する国際ワークショップ

日時：
2023年10月30日 - 31日

場所：
OECD本部（フランス・パリ）

参加者：
オンライン参加者を含め、約300名

スポンサー：
内閣府、
CNIC（Canadian Nuclear Isotope Council）、
Curium社、Lantheus社、
CNL（Canadian Nuclear Laboratories）

概要：
ワークショップでは、Mo-99 の供給の現状と信頼性を維持するために必要な措置について検討するとともに、診断と治療のための新たなRIについて議論。
内閣府からは、畑澤順原子力委員会参与が出席し、オープニングセッションで挨拶をするとともに、日本政府の取組等を紹介。



- 令和4年8月26日に策定された新産業創出等研究基本計画に基づき、福島国際研究教育機構(F-REI)において、日本や世界の抱える課題、地域の現状等を勘案し、その実施において福島の優位性が発揮できる以下の5分野について、研究開発を実施する。
- 令和5年度の研究の実施にあたっては、令和4年度先行研究による成果や今後、F-REI設立時に主務大臣が策定・指示する中期目標及びF-REIが作成する中期計画も踏まえ、福島をはじめ東北の被災地の中長期的課題、ひいては世界の課題の解決に資する、国内外に誇れる研究開発を実施していく。

各研究領域の主な事業

【①ロボット】39.7億円

廃炉作業の着実な推進を支え、災害現場等の過酷環境下や人手不足の産業現場等でも対応が可能となるよう、ロボット等の研究開発を行う。

(令和5年度の研究内容)

- 廃炉を想定した遠隔操作の要素技術（触覚フィードバック等）の開発や放射性物質の分析手法の標準化
- 自然災害等の困難環境での作業ロボットの試作機開発
- 水素ドローンの実現に向け、水素ガスタービン等の概念設計・試作を実施



【②農林水産業】7.3億円

スマート農業やカーボンニュートラル等を通じた地域循環型経済モデルの構築を目指し、超省力・低コストな持続性の高い農林水産業に向けた実証研究を行う。

(令和5年度の研究内容)

- 多様な従事スタイルを実現する生産システムの構築・実証
- 農山漁村エネルギーネットワーク・マネジメントシステムの構築・実証
- 先端技術を活用した害虫防除・鳥獣被害対策システムの構築・実証
- 新たな農林水産資源の開発及び生産・活用



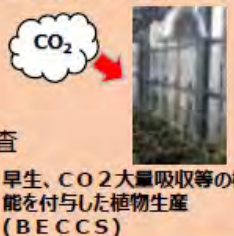
複数ほ場を自律的に移動、作業する農機制御システム

【③エネルギー】22.1億円

福島を世界におけるカーボンニュートラル先駆けの地とするため、水素エネルギーネットワークの構築や、ネガティブエミッション技術の研究開発を進める。

(令和5年度の研究内容)

- 多収性植物からバイオエタノール生産及び発酵ガスの回収をラベレベルで実施
- ネガティブエミッション技術（BECCS/ブルーカーボン）の動向調査及び吸収能向上技術を開発
- 再生可能エネルギーを利用した水素エネルギーシステムの全体設計及びプロトタイプの開発を開始



【④放射線科学・創薬医療、放射線の産業利用】19.6億円/14.1億円

オールジャパンの研究推進体制の構築と放射線科学に関する基礎基盤研究やRIの先進的な医療利用・創薬技術開発及び超大型X線CT装置等を中心とした技術開発による放射線の産業利用を実現する。

(令和5年度の研究内容)

- アルファ線放出核種等を用いた新たなRI医薬品の開発等、創薬医療分野における世界最先端の研究開発の推進
- 超大型X線CT装置の詳細設計や画像処理基盤技術の研究開発及び現物データ利活用へ向けた検討



アルファ線放出核種により前立腺がんが寛解



世界初のガントリー式超大型X線CT装置

【⑤原子力災害に関するデータや知見の集積・発信】9.0億円

自然科学と社会科学の研究成果等の融合を図り、原子力災害からの環境回復、原子力災害に対する備えとしての国際貢献、更には風評払拭等にも貢献する。また、原発事故被災地域における機構を核とした復興まちづくりを進め、活力ある地域づくりにつなげる。

(令和5年度の研究内容)

- 長期生態学研究の国内外事例調査及び環境影響評価シミュレーターのモデル開発
- 自然資源への放射性セシウム移行調査及び森林や河川等における放射線セシウムの移行挙動を再現する数値モデルの開発・精緻化
- ICRU（国際放射線単位測定委員会）の年会・シンポジウムの開催・ICRP（国際放射線防護委員会）等の国際会議の招致
- 被災者・コミュニティ・被災地域等の再生・創生研究、国際人材交流・育成、それらの実装化に向けたネットワークや様々な研究者が関わるハブ機能の構築



中長期的な環境動態研究の実施



ICRP等の国際会議を招致

【予算集約事業】14.3億円

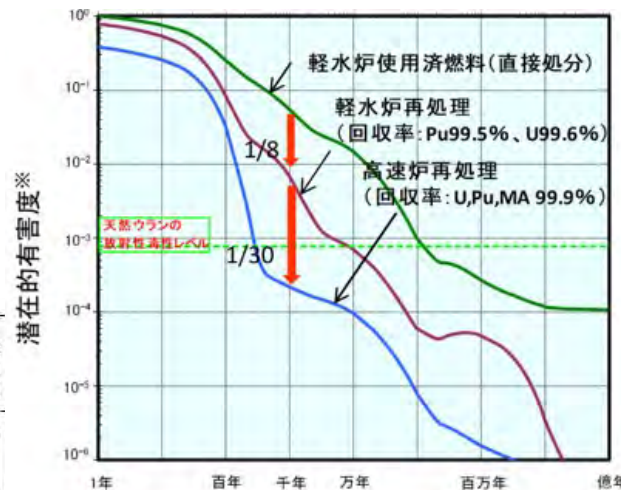
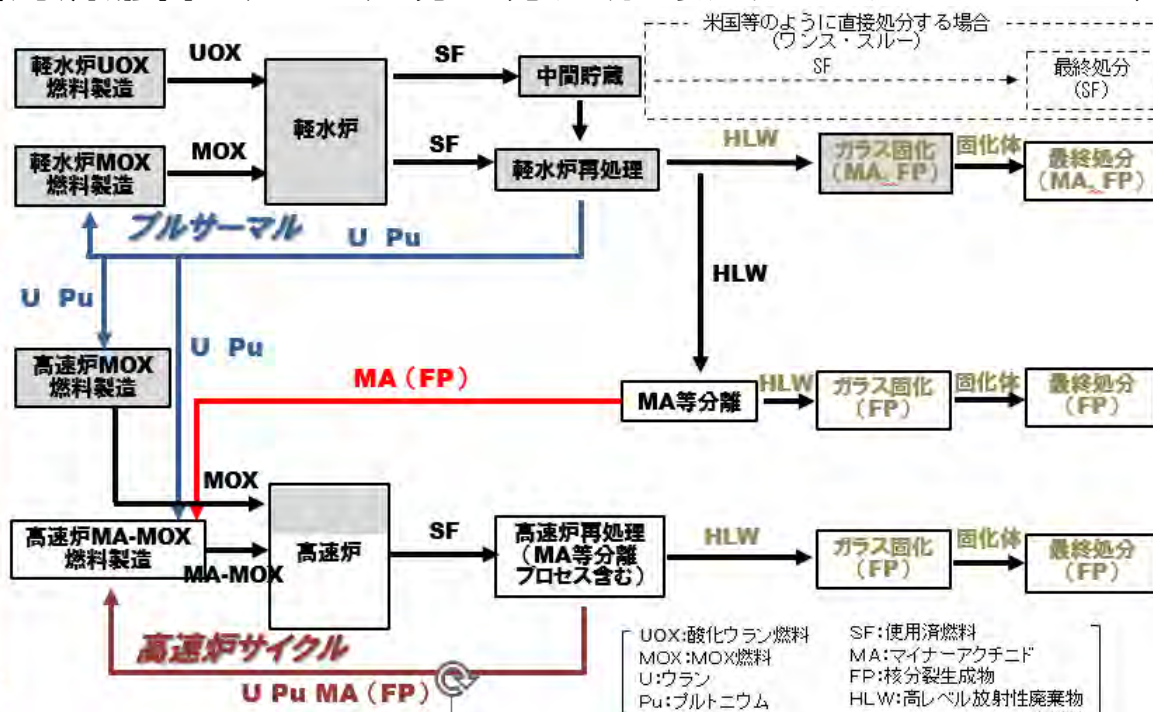
- 農林水産分野の先端技術展開事業
- 被災地企業等再生可能エネルギー技術シーズ開発・事業化支援事業

使用済燃料の処理・処分

原子力利用における使用済燃料の問題

- 核分裂反応を利用する原子力では核分裂生成物が生成される。
- 燃焼しなかったウランやプルトニウム、及び核分裂生成物には長い半減期を有する核種が含まれるためその処理・処分は問題となる。

使用済燃料の処理・処分の方法(直接処分と再処理リサイクル)



MA分離・消滅による潜在的有害度の低減効果

- 「潜在的有害度」とは、使用済燃料や放射性廃棄物が持つ放射能を、人に対する有害度の観点から定量的に比較できるように考えた尺度で、「仮にその放射能をそのまま口から体内に摂取した場合に人が受ける放射線量」を用いている。
- 100万kWの原子力発電所を1年間運転した時の使用済燃料、またはその再処理により発生する放射性廃棄物の潜在的有害度。
- 潜在的有害度は、ウランとプルトニウムを回収した場合(紫色の線)には約8分の1、更にアメリシウム等を回収した場合(青色の線)には約30分の1となるとの試算結果を示している。

使用済燃料の再処理過程でMAを分離・回収する。(高度な技術が必要)
回収したMAはウランやプルトニウムに含有させた燃料として高速炉で消滅させる。

IAEAによる盗取に対する核物質の区分

この量以下は
核物質防護対象外

物質	形態	区分Ⅰ	区分Ⅱ	区分Ⅲ ^c
1. プルトニウム ^a	未照射 ^b	2 kg 以上	500 g 超～2 kg 未満	15 g 超～500 g まで
2. ウラン235	未照射 ^b - 濃縮度 20%以上	5 kg 以上	1 kg 超～5 kg 未満	15 g 超～1 kg まで
	- 濃縮度 20%未満、10%以上		10 kg 以上	1 kg 超～10 kg 未満
	- 天然ウラン～濃縮度10%未満			10 kg 以上
3. ウラン233	未照射 ^b	2 kg 以上	500 g 超～2 kg 未満	15 g 超～500 g まで
4. 照射燃料(この表の照射燃料の区分は国際輸送の要件に基づいている。国は自国内の使用、貯蔵および輸送に対し、すべての関係する要因を考慮に入れて、異なった区分を割り当てることが許される。)			劣化ウラン、天然ウラン、トリウムまたは低濃縮燃料(核分裂性物質の含有率が ^d 10%未満) ^{d/e}	

^a すべてのプルトニウム(プルトニウム238の同位体濃度が80%を超えるプルトニウムを除く。)

^b 原子炉内で照射されていない核物質、または原子炉内で照射された核物質であって、遮蔽がない場合に、この核物質から1メートル離れた地点で1時間あたり1グレイ(1時間あたり100ラド)以下の放射線量率を有するもの。

^c 区分Ⅲに掲げる量未満のものおよび天然ウラン。劣化ウラン並びにトリウムは、少なくとも慣行による慎重な管理に従って防護するものとする。

^d この防護レベルが望ましいが、各国は具体的な状況の評価に基づいてこれと異なる区分の防護レベルを指定することができる。

^e 他の燃料であって、当初の核分裂性物質含有量により、照射前に区分Ⅰおよび区分Ⅲに分類されているものについては、遮蔽がない場合にその燃料からの放射線量率が1メートル離れた地点で1時間あたり1グレイ(1時間あたり100ラド)を超える間は、防護レベルを1区分下げることができる。

プルトニウム利用と核拡散抵抗性 (2)

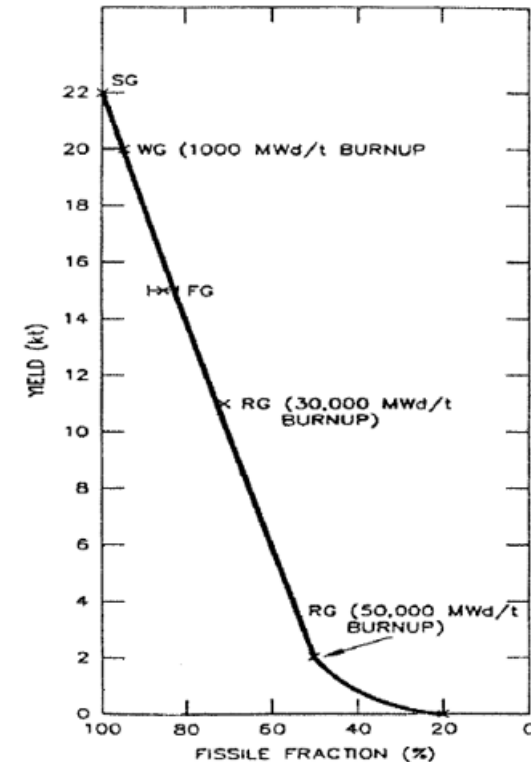
プルトニウムの等級区分

等級	Pu-240の比率 ¹⁾ (%)	Pu-240の比率 ²⁾ (%)	核兵器への適合性 ²⁾
超核兵器級(SG) Super grade		<3	最高物質 Best quality
核兵器級(WG) Weapon grade	<7	3 - 7	標準物質 Standard material
燃料級(FG) Fuel grade	7 - 18	7 - 18	実際に使用可能 Practically usable
原子炉級(RG) Reactor grade	<18	18 - 30	当然使用可能 Conceivably usable
MOX級 MOX grade		>30	実際に使用不可能 Practically <u>un</u> usable

使用済燃料のプルトニウム同位体組成²⁾

Isotope contents in percent of total Pu	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242
Burnup-irradiated LWR uranium oxide					
20 MWd/kg heavy metals (Siemens)	0.7	70	18	10	1.6
33 MWd/kg heavy metals (Mark)	1.3	60	24	9	5
33 MWd/kg heavy metals (Siemens)	1.2	58	23	14	4
50 MWd/kg heavy metals (Siemens)	2.7	47	26	15	9
60 MWd/kg heavy metals (Siemens)	3.5	44	27	15	11
Burnup-irradiated LWR mixed oxide					
33 MWd/kg heavy metals (Mark)	1.9	40	32	18	8

収率曲線の計算結果²⁾



上図の縦軸の収率(Yield)の単位はkt
 1kt=TNT 1,000t
 リトルボーイ 広島 12-18kt
 ファットマン 長崎 18-23kt

Ref. 1) Jim Green, "Can "reactor grade plutonium be used in nuclear weapons?," Nuclear Monitor Issue: #787, 06/06/2014

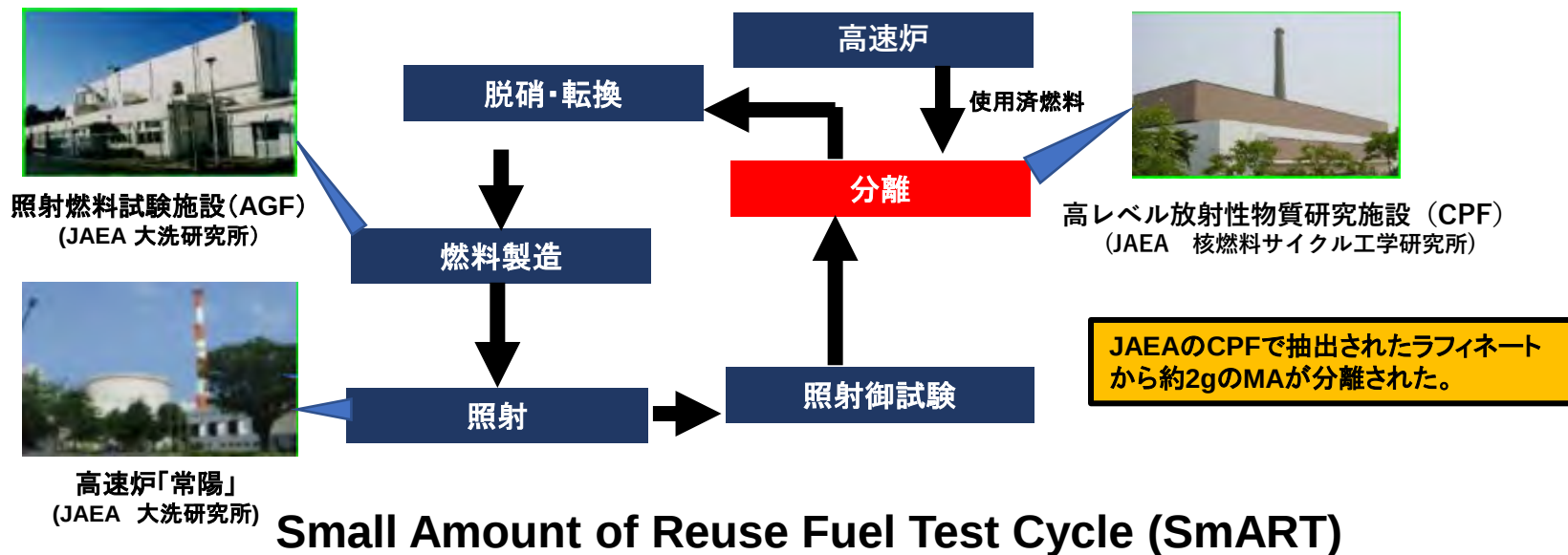
<https://www.wiseinternational.org/nuclear-monitor/787/can-reactor-grade-plutonium-be-used-nuclear-weapons>

Ref. 2) Bruno Pellaud, "Proliferation Aspects of Plutonium Recycling," J. Nucl. Mater. Management, Fall 2002, Volume XXXI, No. 1, PP30.

高速炉「常陽」でのMAリサイクル試験

放射性廃棄物の潜在的有害度減少させるため、使用済燃料からマイナーアクチニド(MA)を回収し、そのリサイクルの有効性を確かめる。

そのため、JAEAでは高速炉「常陽」を用いて、使用済燃料から回収した少量のMAを出発物質としたSmARTプロジェクトを実行した。



SmARTの目標

- MAの分離・変換に関するデータの取得
- 高速炉を用いた小規模での分離・変換サイクルの概念の実証

注釈: JAEAから提供されたデータに基づき内閣府にて図を作成

核のゴミからがん診断・治療薬創製

東大原子力専攻・原子力国際専攻・バイオエンジニアリング専攻・アイソトープ総合センター・
QST放射線医学総合研究所

<< ウラン鉱さい由来のAc-225医薬品生成の全体像
>>

人形峠鉱さいから
Ra-226を抽出
(合計~15g程度の
 ^{226}Ra が見込まれる)



海外

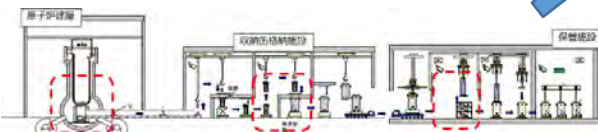
再処理工場



1Fサイト



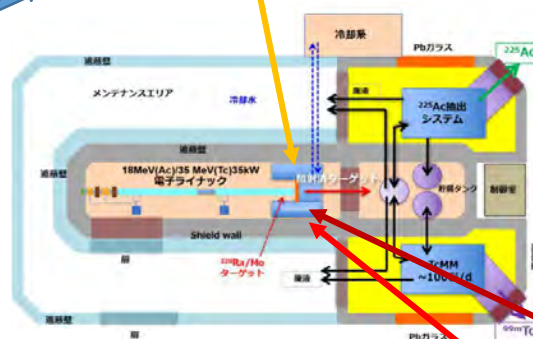
U無し燃料デブリ



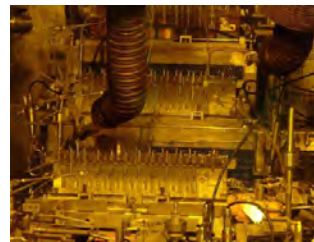
γ 線照射のための
Ra-226ターゲット
化 (化学形態や
担持体の検討)



基礎研究・
動物研究用
試薬をまず供給



ミキサセトラ



分子標的薬の標
識および品質検
査、薬剤の輸送 ->
病院での投与



$^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ (γ 線SPECT
診断、市場1,000億円/
年@日本)

^{67}Cu (β 線PET診断+治療)
 ^{225}Ac (α 線治療)
セラノティクス(治療+診断)
(Theranotics=Therapeutic+D
iagnosis、市場数兆円/年)

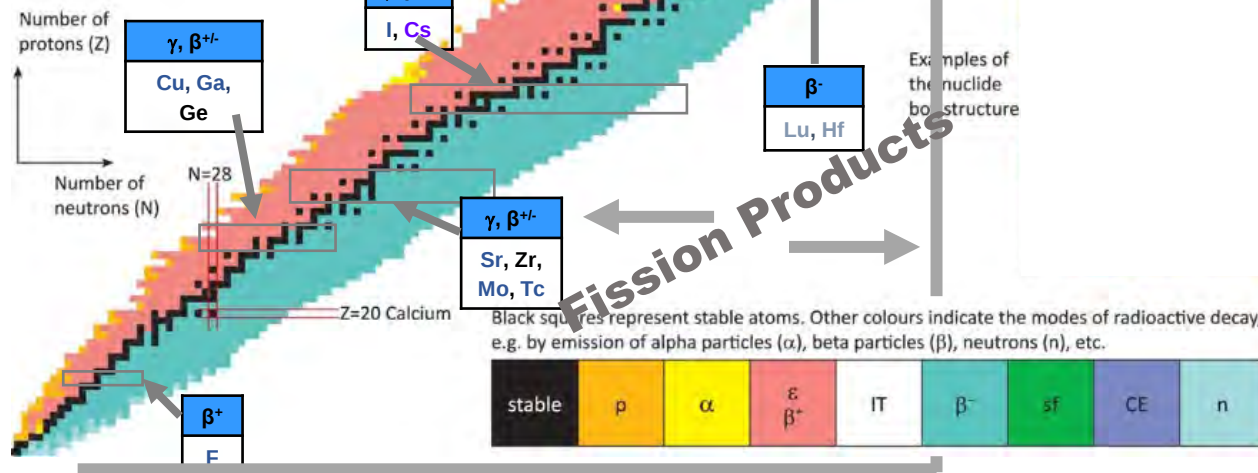
核図表と有効利用する核種

The Karlsruhe Nuclide Chart

A nuclide chart is a two dimensional representation of the nuclear and radioactive properties of all known atoms. A nuclide is the generic name for atoms characterized by the constituent protons and neutrons. The nuclide chart arranges nuclides according to the number of protons (vertical axis) and neutrons (horizontal axis) in the nucleus. Each nuclide in the chart is represented by a box containing the element symbol and mass number, half-life, decay types and decay energies, etc.

"Magic" numbers

In nuclear physics, a magic number is a number of protons or neutrons (e.g. 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126) which give rise to a complete shell in the atomic nucleus. Lead 208 for example, which consists of 82 protons and 126 neutrons, is called "doubly magic" since both the proton and neutron numbers are "magic".



Nuclei for energy use

Nuclei for medical use

Nuclei colored by purple are toxic or troublesome ones.

Ref 1 Zsolt Soti, Joseph Magill and Raymond Dreher, "Karlsruhe Nuclide Chart-New 10th edition 2018," EPJ Nuclear Sci. Technol. 5, 6 (2018) https://www.epj-n.org/articles/epjn/full_html/2019/01/epjn180014/epjn180014.html

Ref 2 Table of Isotopes CD ROM Edition, Version 1.0, March, 1996

結言

- 原子力は、エネルギーのベストミックスの中で、世界のカーボンニュートラル目標達成、安定で適切なコストでの電力供給に貢献します。
- 転移がん・認知症の診断・治療に核医学Theranosticsが適用されています。
- 学生諸君は、夢をもって勉学・研究に取り組んでください。
- 社会人になってもCompetence向上のための自己研鑽を継続してください。

ご清聴ありがとうございました。