



原子力と資源循環

－第4世代炉の開発動向－

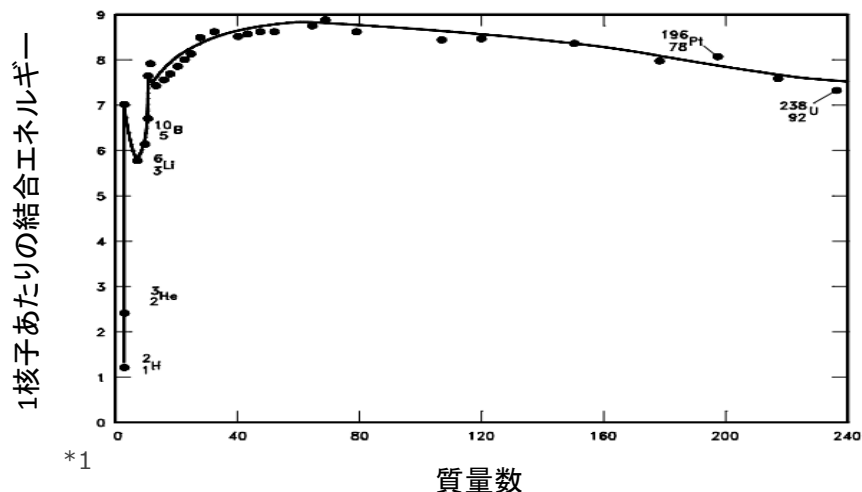
日本原子力研究開発機構

上出 英樹

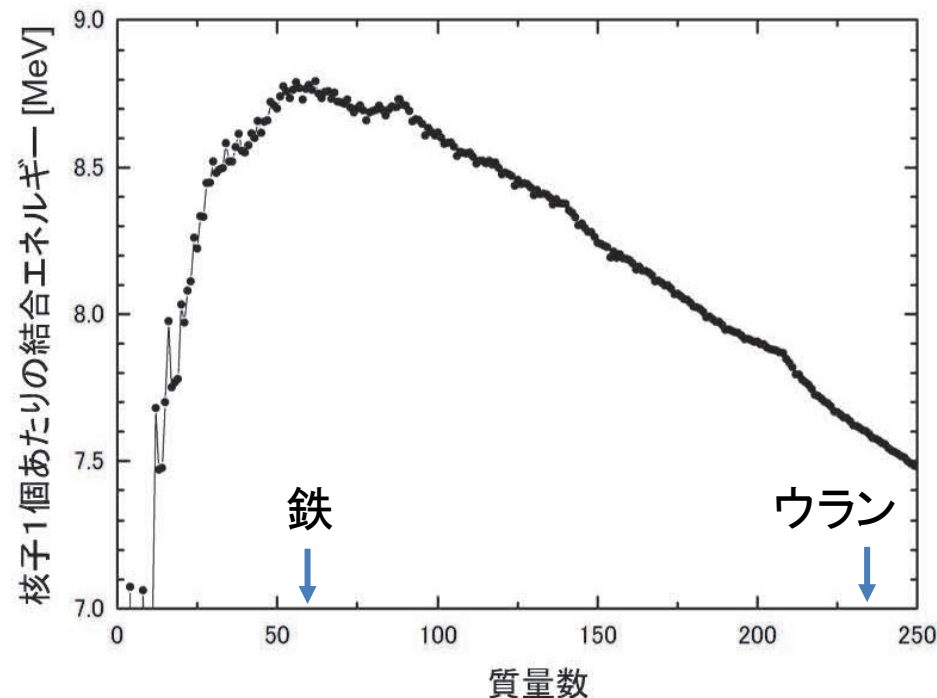
- 原子力？
- 脱炭素社会に向けて
- 原子力の持続可能性
- 高速炉サイクル（エネルギーと資源循環）
- 世界の革新炉・高速炉開発
- 次世代革新炉の現状と今後について（日本）
- 原子力機構での高速炉サイクル研究開発
- Generation-IV International Forum (GIF)
 - GIF Webinar と日本語ガイド

原子力？

核融合と核分裂：核力による核子の結合



拡大



*1 出典：DOE FUNDAMENTALS HANDBOOK NUCLEAR PHYSICS AND REACTOR THEORY, Volume 1 of 2, U.S. Department of Energy

*2 出典：原子炉の物理 (2019年12月), p. 53, 図3-2, 日本原子力学会炉物理部会, https://rpg.jaea.go.jp/else/rpd/others/study/text_data/all_20200108.pdf

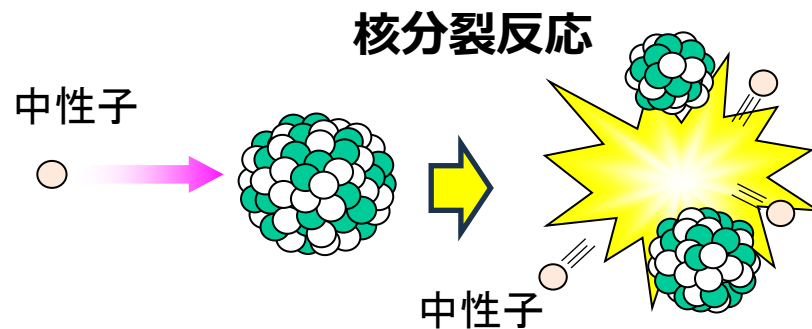
*2 図 3-2 安定な原子核の核子当たりの結合エネルギー

原子番号：陽子の数

質量数：核子（陽子と中性子）の数

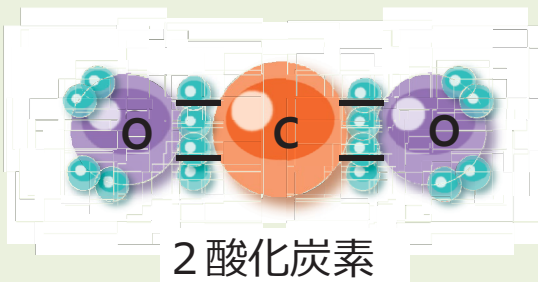
ウラン

U-235（原子番号92、質量数235）



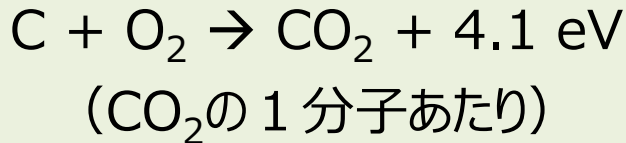
核融合と核分裂：核力による核子の結合

1核子あたりの結合エネルギー



化学反応と電子の共有結合

出典：鈴木久男, ゼロからはじめる「科学力」養成講座1(2011),
第11章 化学と化学結合,
<https://ocw.hokudai.ac.jp/lecture/scienceliteracy1-2011>

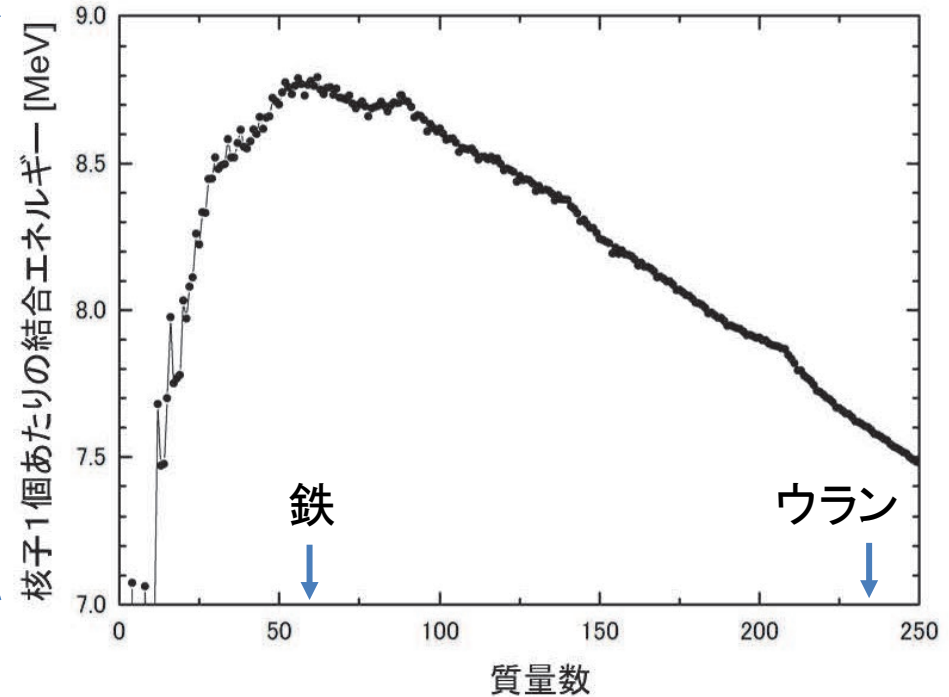


原子番号：陽子の数

質量数：核子（陽子と中性子）の数

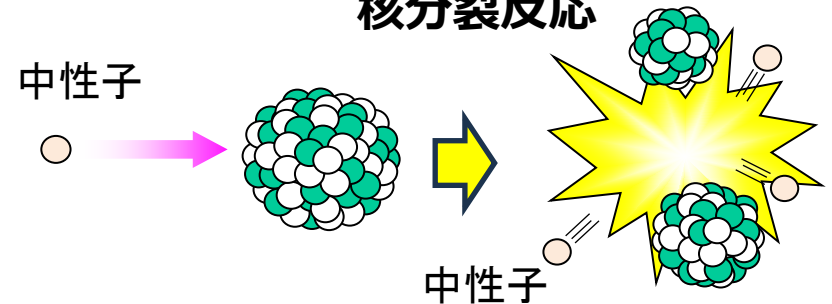
ウラン

U-235（原子番号92、質量数235）



*2 図 3-2 安定な原子核の核子当たりの結合エネルギー

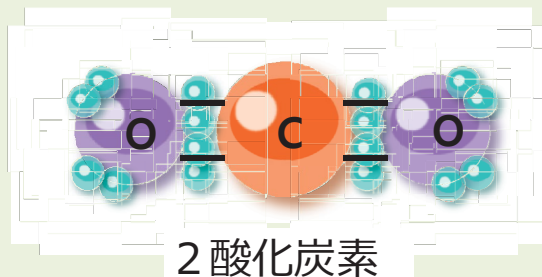
核分裂反応



*1 出典
THE
*2 出
http

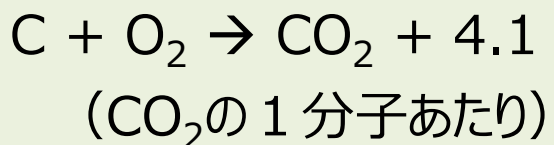
核融合と核分裂：核力による核子の結合

1核子あたりの結合エネルギー



化学反応と電子の共有結合

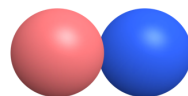
出典：鈴木久男, ゼロからはじめる「科学力」養成講座
第11章 化学と化学結合,
<https://ocw.hokudai.ac.jp/lecture/scienceliteracy1>



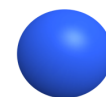
*1 出典
THE
*2 出
http

核融合のしくみ

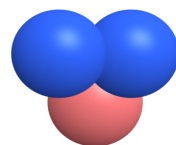
重水素(デューテリウム)



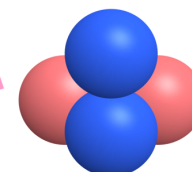
中性子



核融合



三重水素(トリチウム)



ヘリウム

水素の仲間(同位体)である**重水素**(D)と**三重水素**(T)の原子核が融合するDT核融合反応では、ヘリウムと中性子ができます

参考: QST 誰でも分かる核融合のしくみ | 核融合とは?
<https://www.qst.go.jp/site/jt60/4930.html>

原子番号：陽子の数

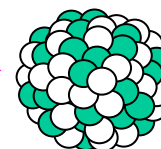
質量数：核子(陽子と中性子)の数

ウラン

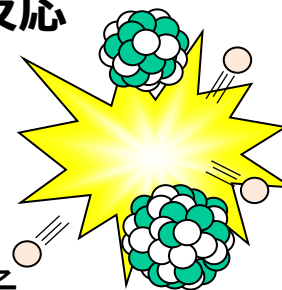
U-235 (原子番号92、質量数235)

核分裂反応

中性子

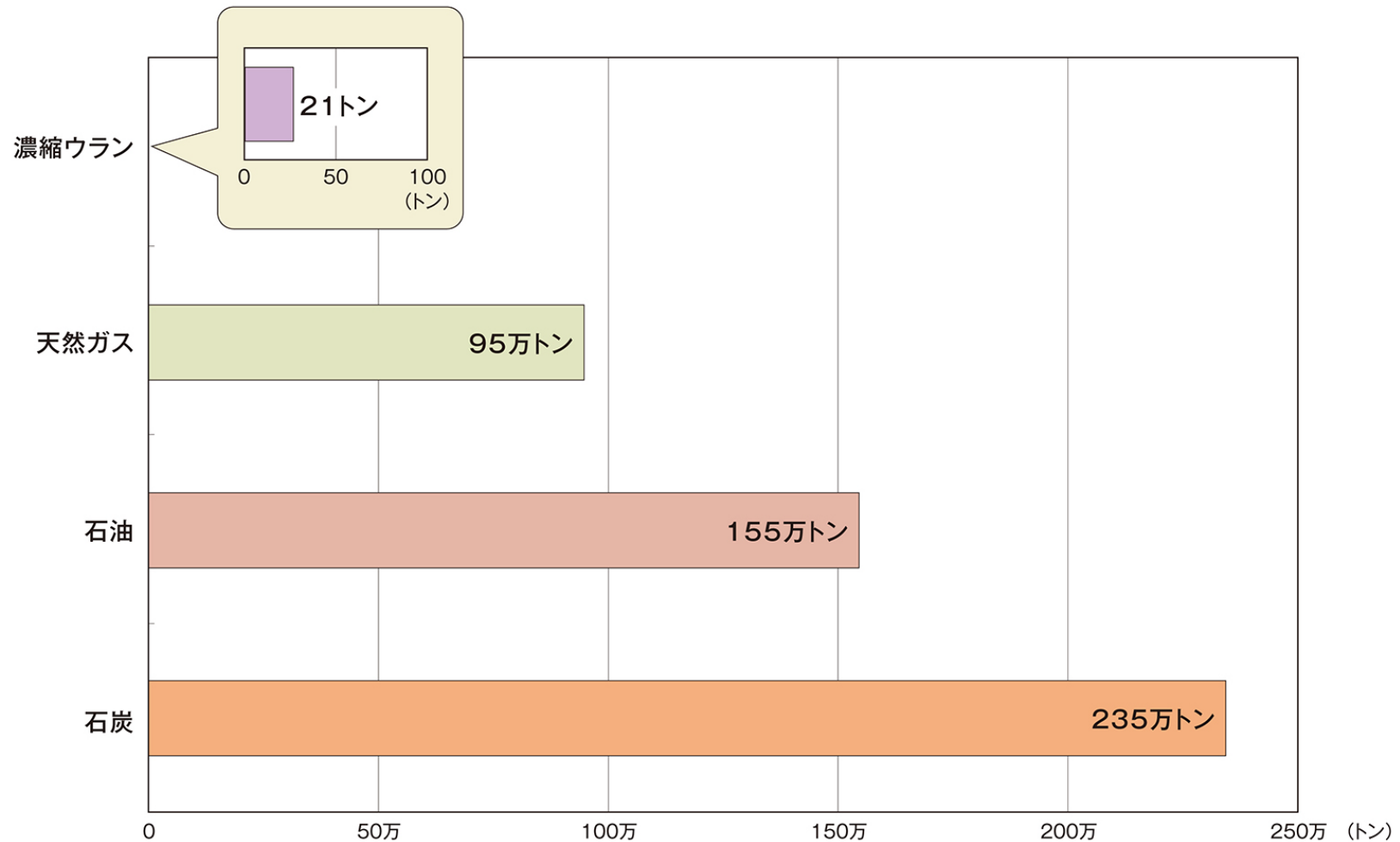


中性子



様々な発電プラントの運転に必要な燃料資源の量

100万kWの発電所を1年間運転するために必要な燃料



脱炭素社会に向けて

脱炭素社会に向けて

● 敷地専有面積



原子力発電（軽水炉）

- 1.0 GWe
- 0.6 km² (例)

*1

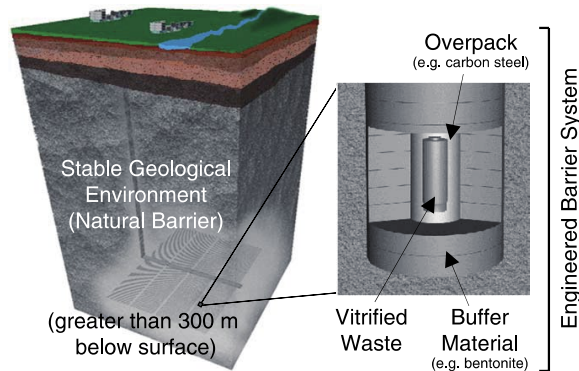


メガソーラ

- 0.1 GWe
- 2.2 km² (例)

*2

● 廃棄物



原子力発電

- 高レベル放射性
廃棄物の地層
処分



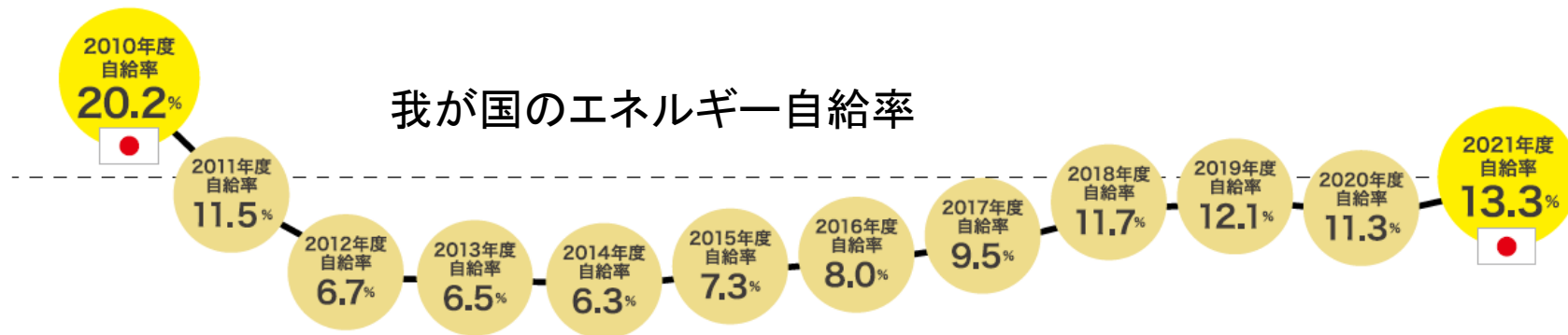
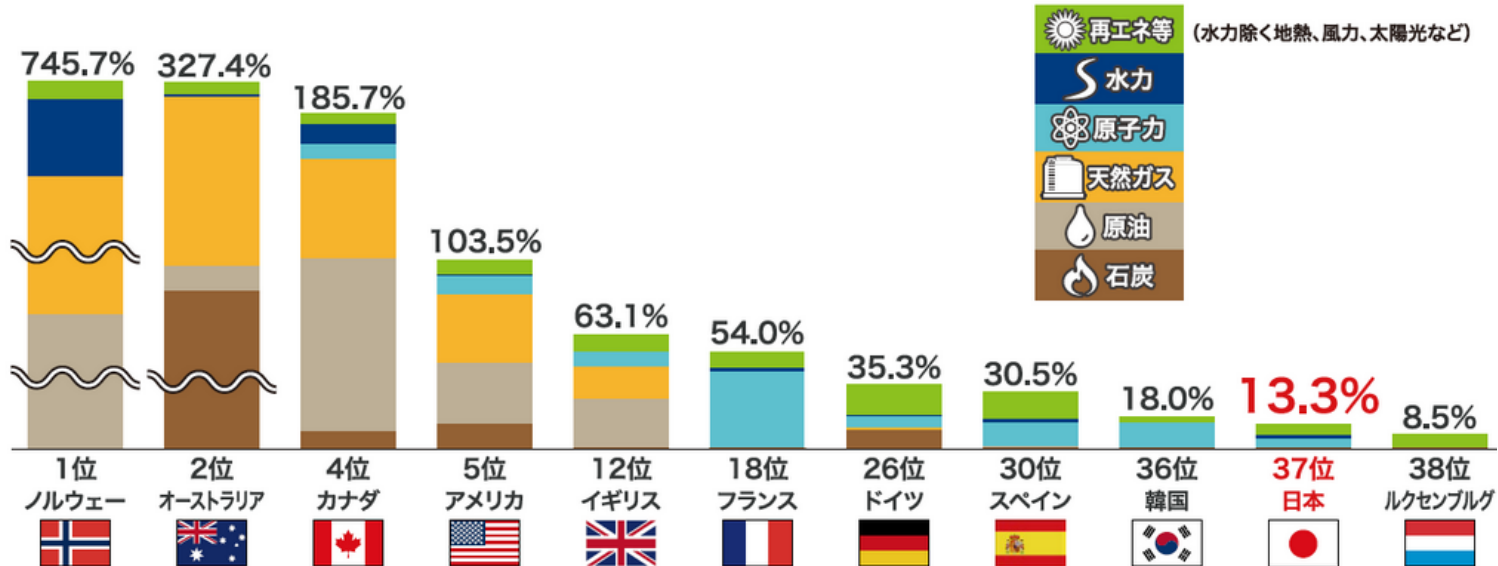
火力発電

- 大量の廃棄物
- 炭酸ガス

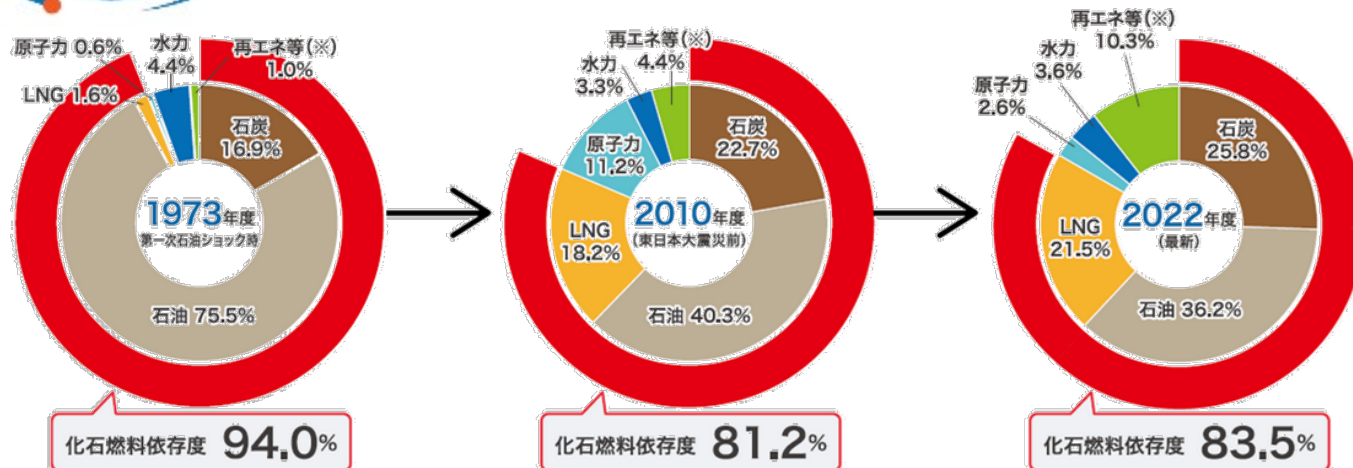
*3

エネルギー安全保障と地球温暖化対策

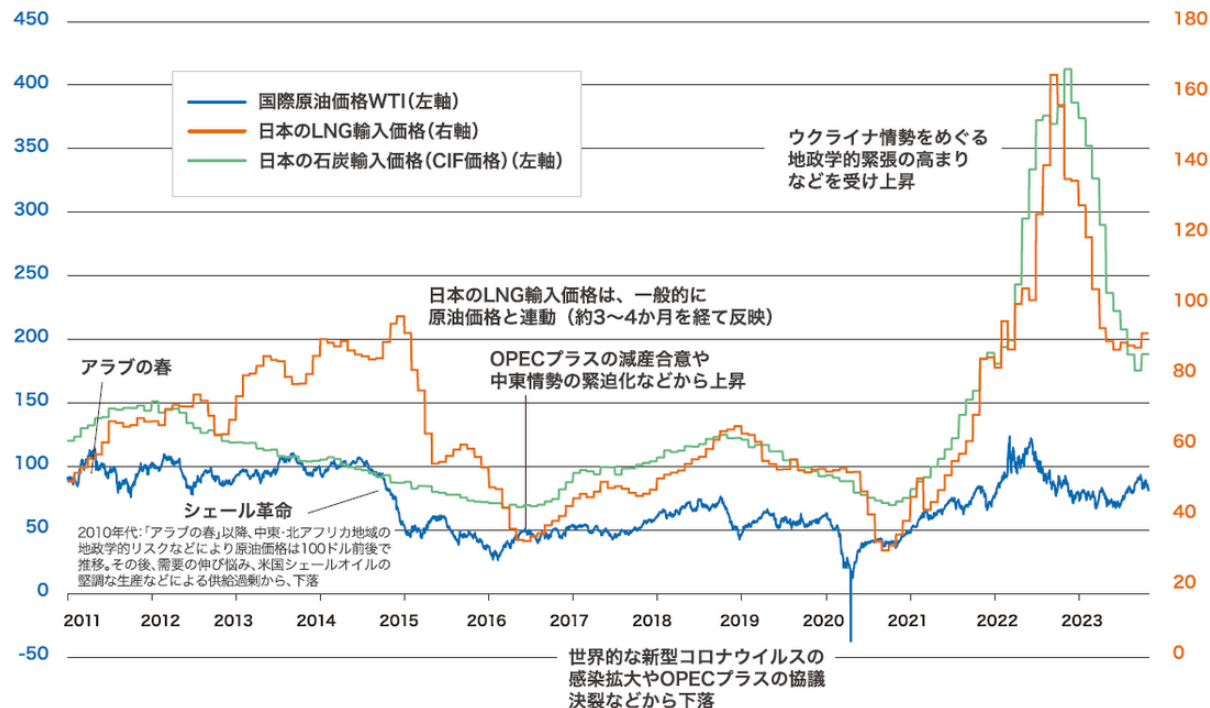
主要国の一次エネルギー自給率比較(2021年)



化石燃料への依存



国際原油価格WTI(ドル/バレル)
日本の石炭輸入価格(ドル/トン)



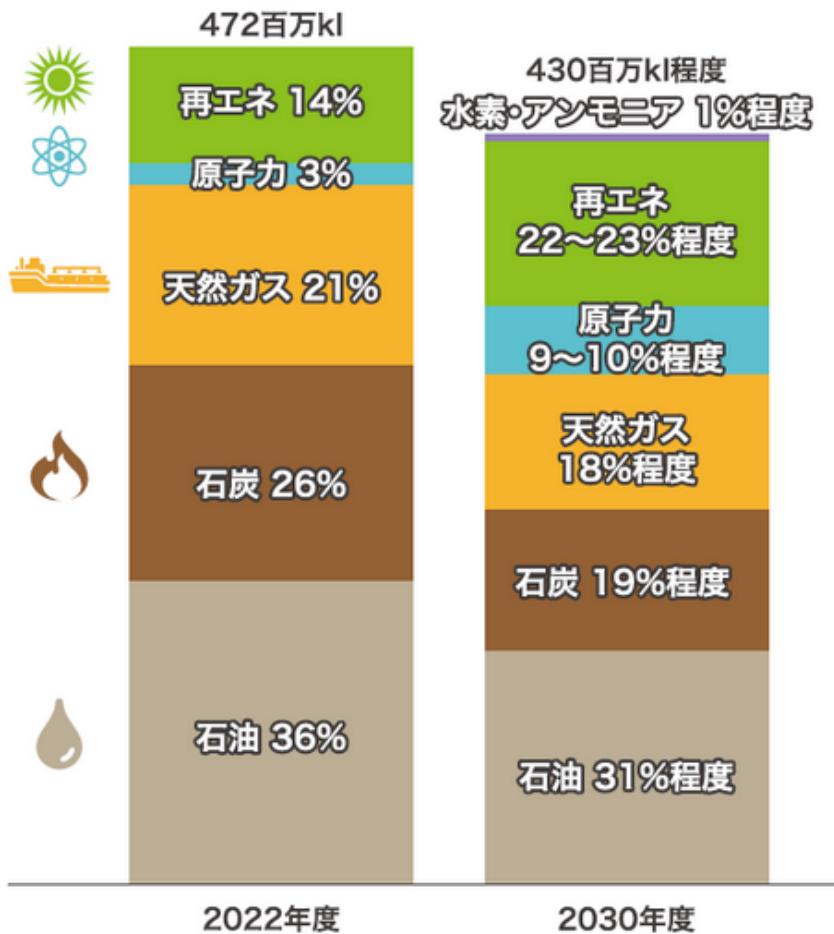
過去の燃料価格の推移と現在の状況

日本のエネルギー政策：S+3E

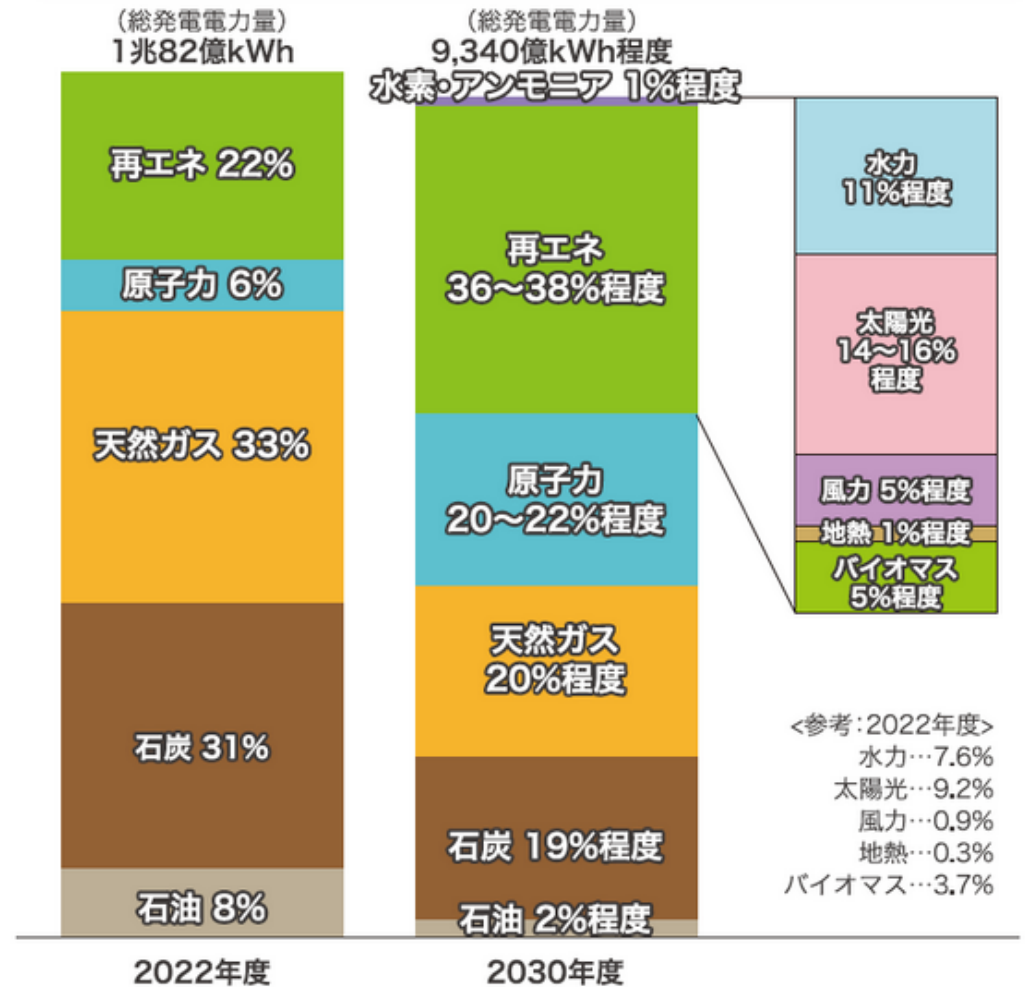


2030年度におけるエネルギー需給の見通し 「エネルギーミックス」の策定

一次エネルギー供給

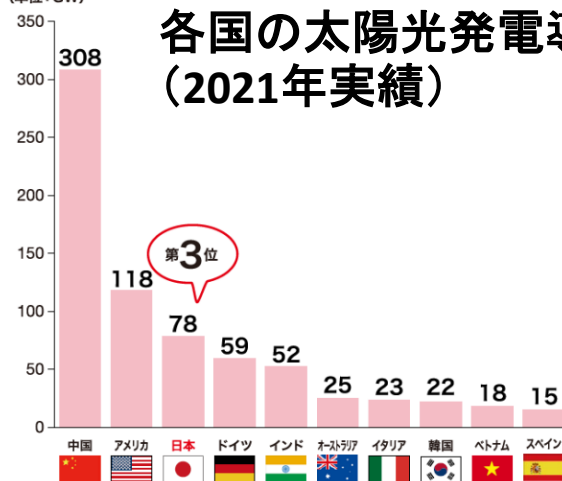


電源構成



(単位: GW)

各国の太陽光発電導入容量 (2021年実績)

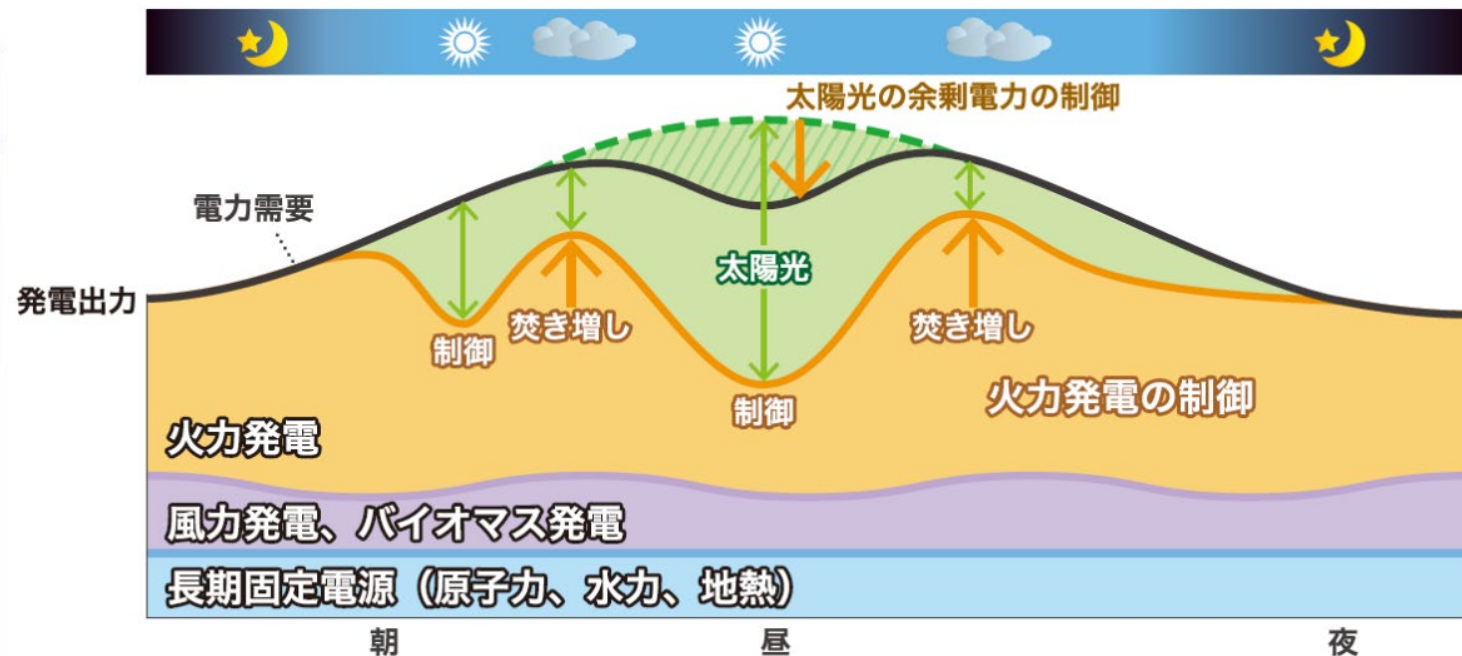


- 再エネは**季節や天候によって発電量に変動**するため、その変動を調整するための手段を確保しておくことが必須
- 火力発電など**出力が調整できる電源**(電気をつくる方法)や、エネルギーを蓄積できる蓄電池などの設備と組み合わせ

最小需要日の需給イメージ

日本のメガソーラー

パシフィコ・エナジー
作東メガソーラープロジェクト
発電規模: 257.7メガワット、
所在地: 岡山県美作市



再生可能エネルギーと調整電源

(単位: GW)

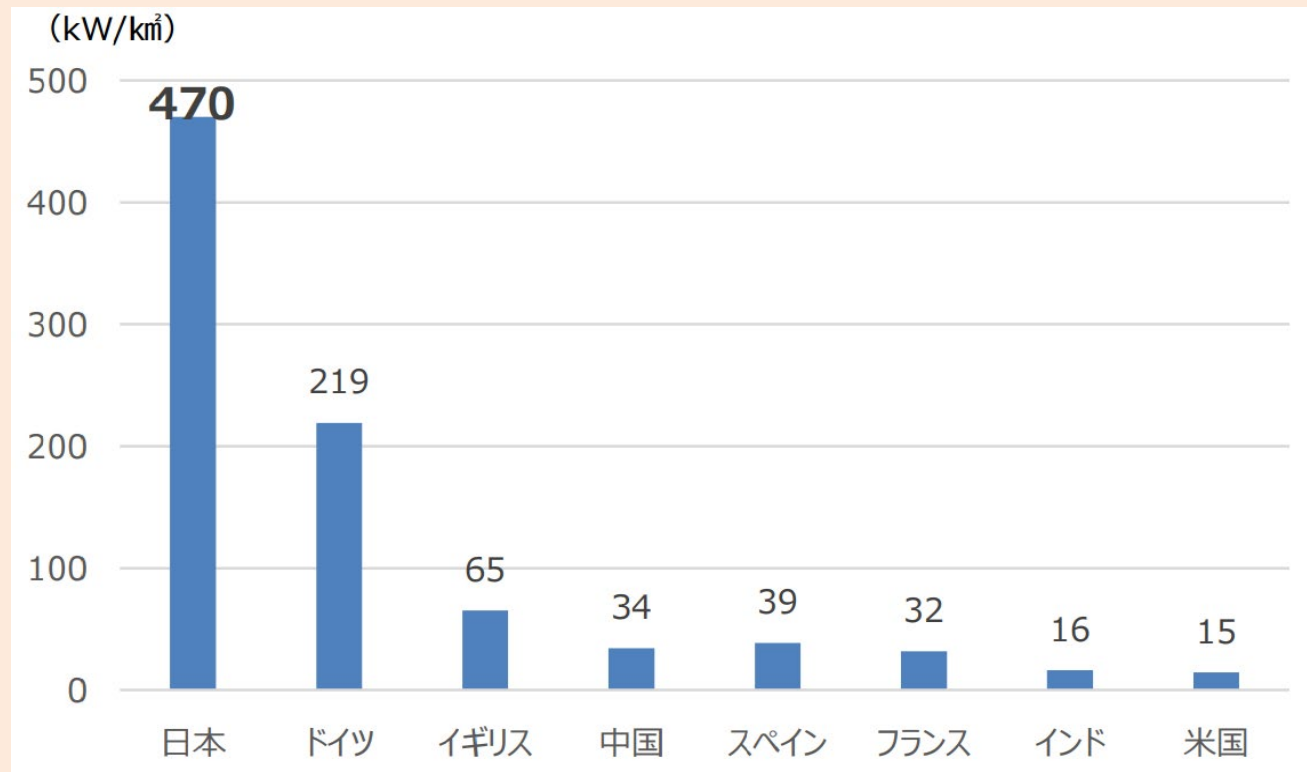
各国の太陽光発電導入容量 (2021年実績)



- 再エネは季節や天候によって発電量が変動するため、その変動を調整するための手段を確保しておくことが必須

日本のメガソーラー

パシフィコ・エナジー
作東メガソーラープロジェクト
発電規模: 257.7メガワット
所在地: 岡山県美作市



出典: 再生可能エネルギー発電設備の適正な導入及び管理のあり方に関する検討会について (2022年4月26日),
資源エネルギー庁,
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/041_s01_00.pdf

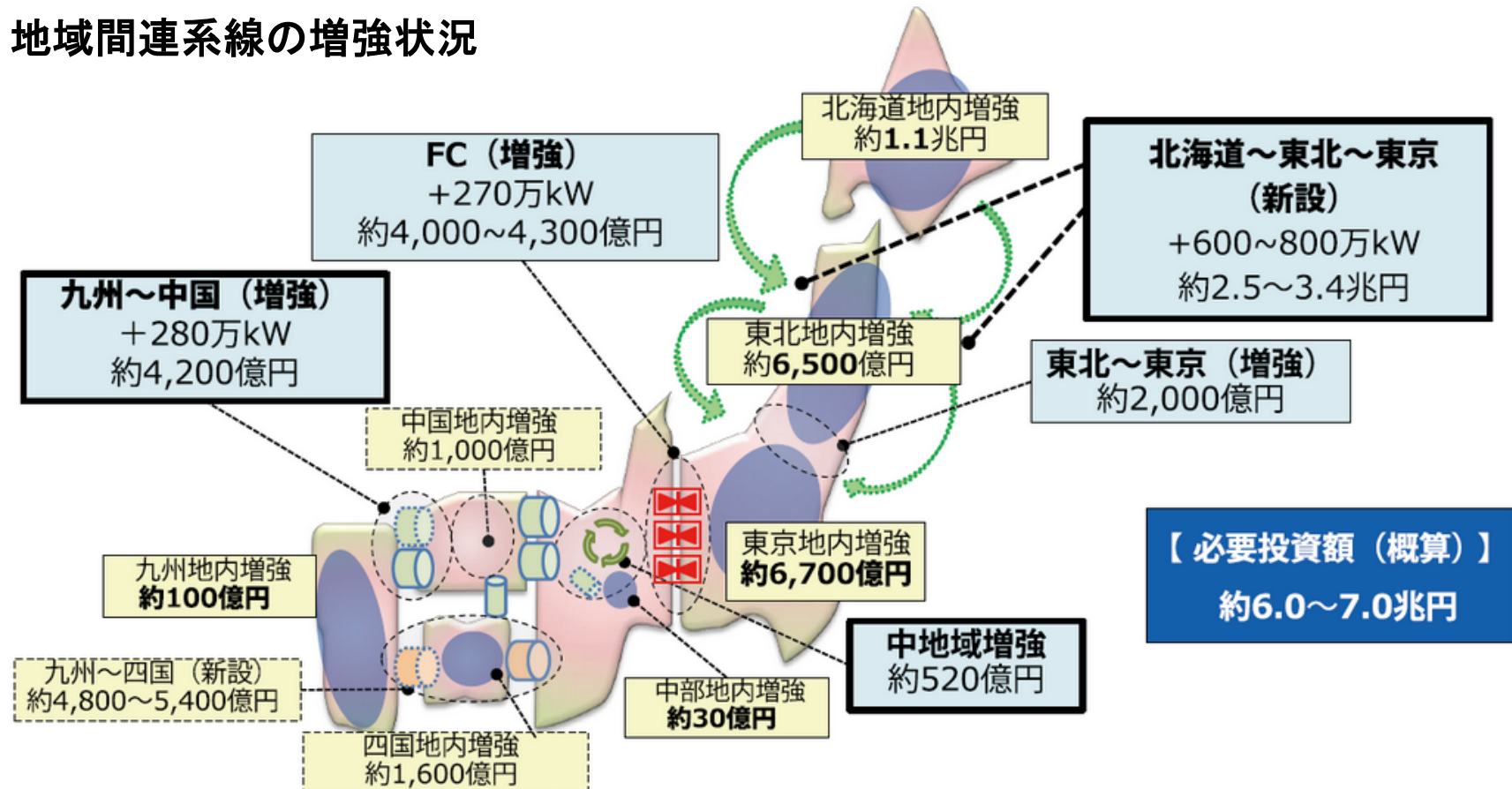


出典: 資源エネルギー庁、2023—日本が抱えているエネルギー問題 (中編)
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energyissue2023_2.html

自然災害対応、再エネの拡大と電力レジリエンスの強化

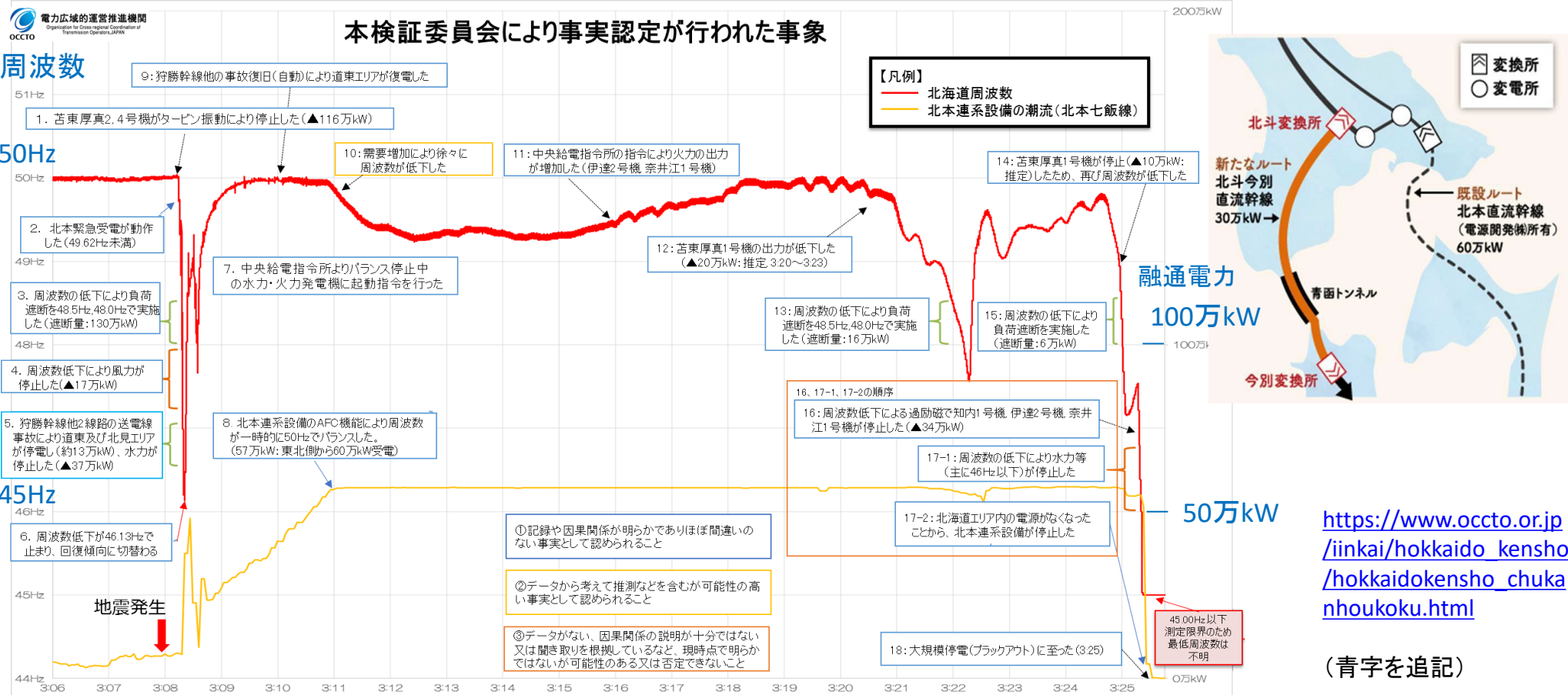
- 電力事業者間が災害時に連携して復旧に当たる枠組みの整備、**送配電網の強靱化**、災害に強い**分散型電力システム**の構築
- 2050年カーボンニュートラルも見すえて、再エネの大量導入と電力インフラの強靱化を系統増強により実現する旨の具体的な計画（**広域連系系統**のマスタープラン）を公表（2023年3月）

地域間連系線の増強状況



平成30年北海道胆振東部地震に伴う大規模停電に関する検証委員会中間報告（概要）

- 北本連系設備については、マージンを活用して期待していた緊急融通が動作していた。
- 北本連系設備は最大受電量の状態が続き、本来備えていた急速な変動を調整する機能を発揮できなかった。
- 現在、新たなルートとして北斗今別直流幹線を通す新北本連系設備を建設中であり、2019年3月に運転開始予定となっている。（予定通り、2019年3月に運転を開始）



https://www.occto.or.jp/iinkai/hokkaido_kensho/hokkaidokensho_chukanhokoku.html

（青字を追記）

■ 地球温暖化とパリ協定：再生可能エネルギーの導入が本格的に進む

- **再エネ**の利用が、世界中で今世紀中頃に向けて台頭
- ✓ 投資額は火力・原子力を凌駕、設備規模は火力・原子力に並ぶ勢い
- ✓ 変動再エネ（太陽光、風力）の稼働率は低く、設備規模に比べ電力量は低い

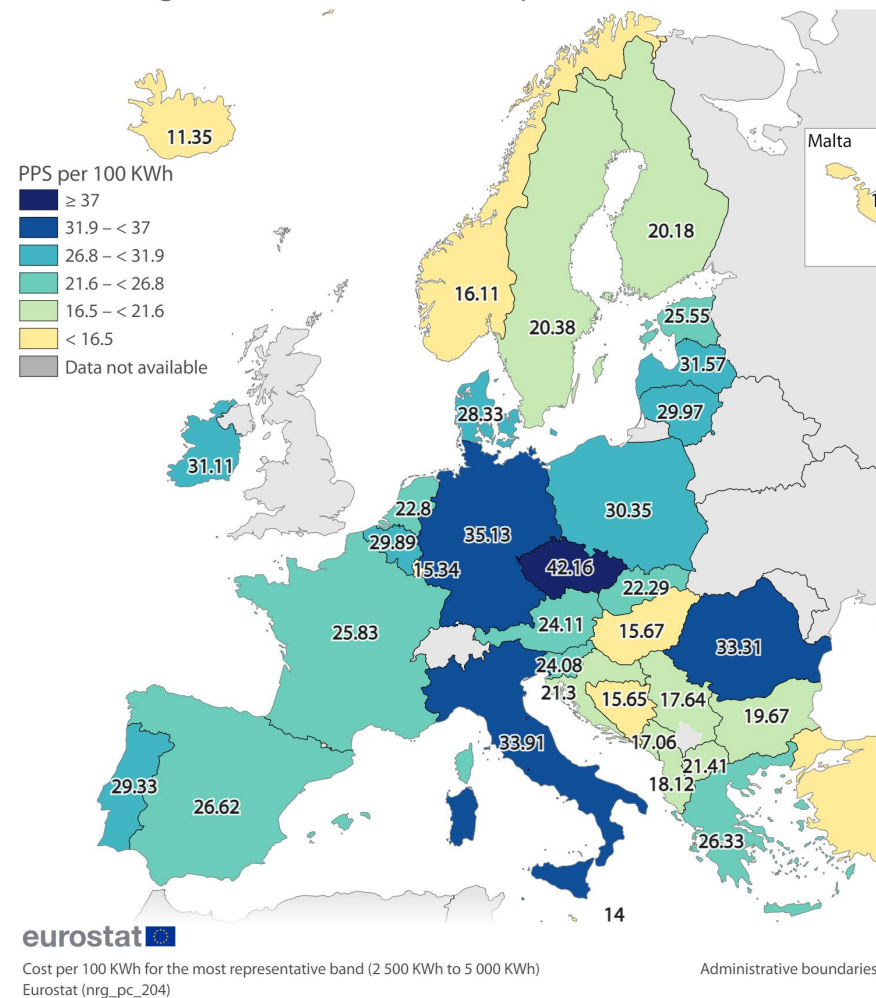
■ 先行導入国での現実

- **ドイツ：脱原発と再エネ拡大の両方**を進める
 - ✓ 原発停止と再エネ増加に伴い石炭利用が増加、**CO₂減少は進まない。**
 - ✓ **電気代は高騰**（2010年32円/kWh→2015年40円/kWh）
 - ✓ 電力供給の安定化に**欧州の電力網**を利用
- 原子力を活用する国・地域 ⇒ 安価で脱炭素化に近い成果を実現
 - ✓ 原子力を含む全方位の脱炭素戦略：英国
 - ✓ **原子力と安定再エネ**（水力）を主軸：フランス、スウェーデン、米国ワシントン州等

□ 再エネだけで生き残れるのか？

- COP28→29: 2050年までに原子力の設備容量を3倍にする。賛同国は25→31カ国に。

Electricity prices for household consumers, 2024 S1
Purchasing Power Standards (PPS) per 100 kWh



ドイツの家庭用電力料金(2024年)
35 Euro/100kWh ~ 56円/kWh



出典：© European Union, 1995-2025,
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics

■ 原子力と再生可能エネルギーの違い

- 原子力発電：現在、大規模集約発電システムを採用
 - ✓ 出力密度が高く、必要面積は小 = 経済性、大口需要に有利
- 再エネ：ローカル分散電源、日本各地に点在
 - ✓ 出力密度が低く、必要面積は大 = 小規模で広く展開
 - ✓ 太陽光、風力は天候に依存し、**変動幅が大きい**。

■ 原子力発電と再エネの連携

- 両者は**脱炭素化電源**として非常に有望な技術
- **信頼性の高い電力網**を構成することが必要
- うまく**組み合わせ**て、不得意な部分を補い合うことにより、日本の主要電源として大幅なCO₂削減に貢献可能

■ 今後の原子力・核燃料サイクル技術の開発にむけて

- 社会のニーズに応じて出力規模など多様な選択肢を用意
- 安定かつ柔軟な出力規模で**再エネの拡大を支え、脱炭素化社会へ**

原子力の持続可能性

■ 世界の原子力発電と天然ウランの需要見通し

- 原子力発電量規模: 2023年 390GWe
⇒ 2050年 に 930GWe程度の予測も。
- 現状のウランの供給設備では、需要を満たせず、設備の大幅な拡充が必要な状況。

□ ウラン資源を全て輸入に頼る日本は、軽水炉の利用に大きな**影響を受けるリスク**

■ 軽水炉の使用済み燃料と**リサイクル**

- 使用済み燃料は使用済み燃料プールなどで保管。さらに中間貯蔵施設を準備。
- その後、「**再処理プラント**」によりウラン、プルトニウムを分離し、**核燃料に再利用**する。長期に亘って放射線を出す高レベル廃棄物は、**ガラス固化体**とする。

NEA-IAEA, Uranium Resources, Production and Demand, 2024

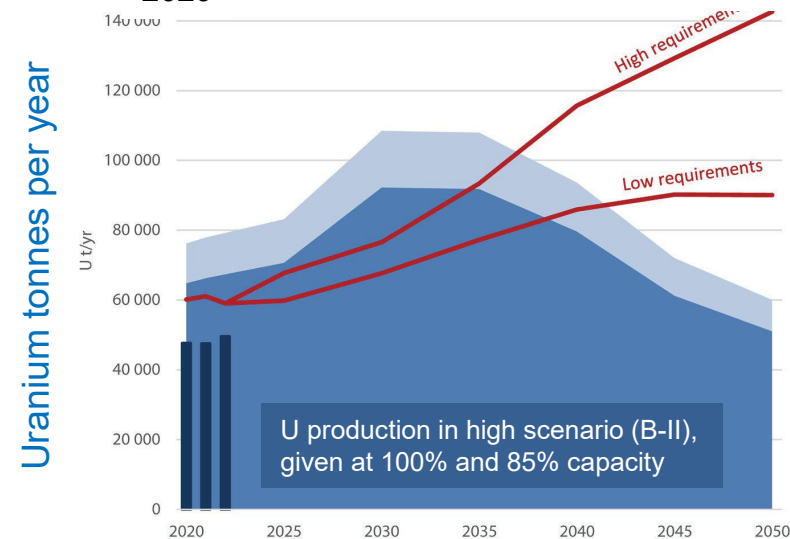
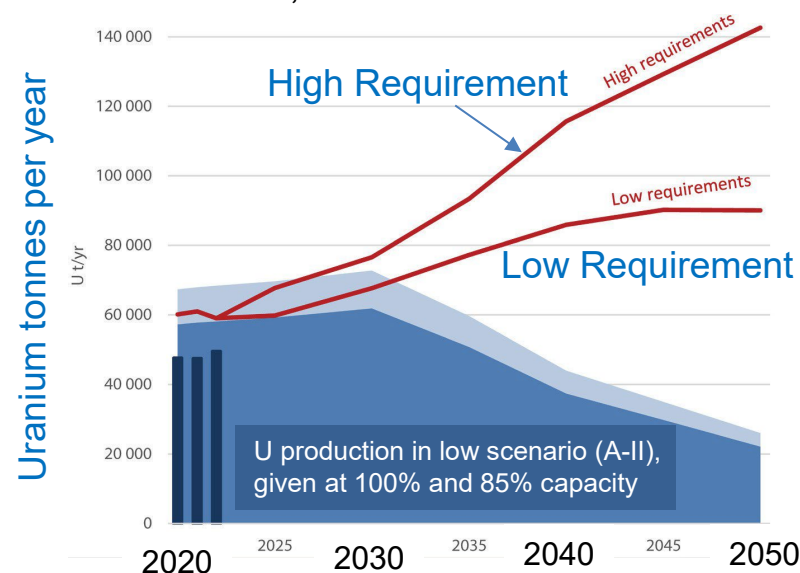
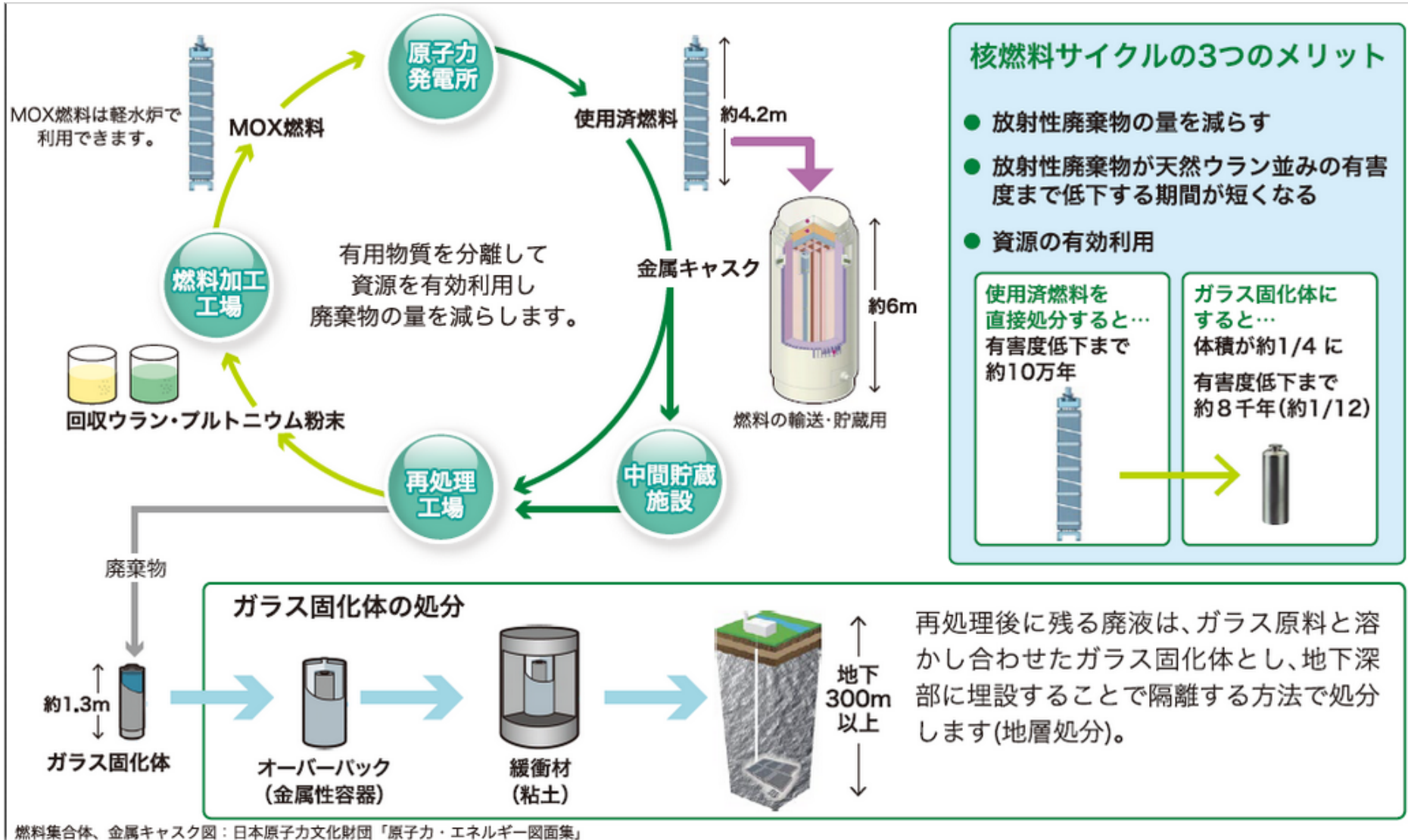
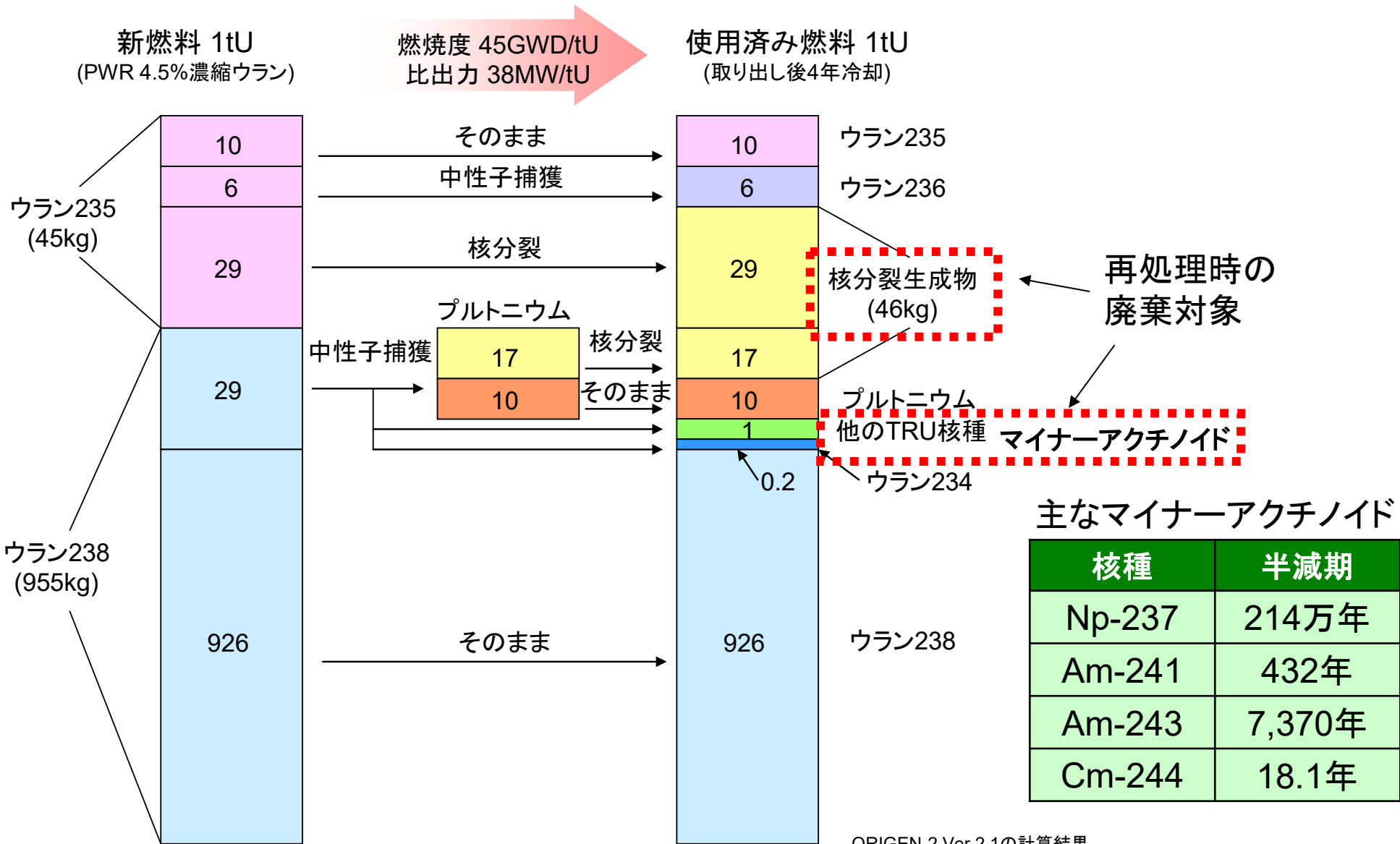


Fig 2.10 Projected world uranium production capability to 2050 (supported by identified resources at a cost of <USD 130/kgU) compared with reactor requirements

核燃料サイクルと放射性廃棄物



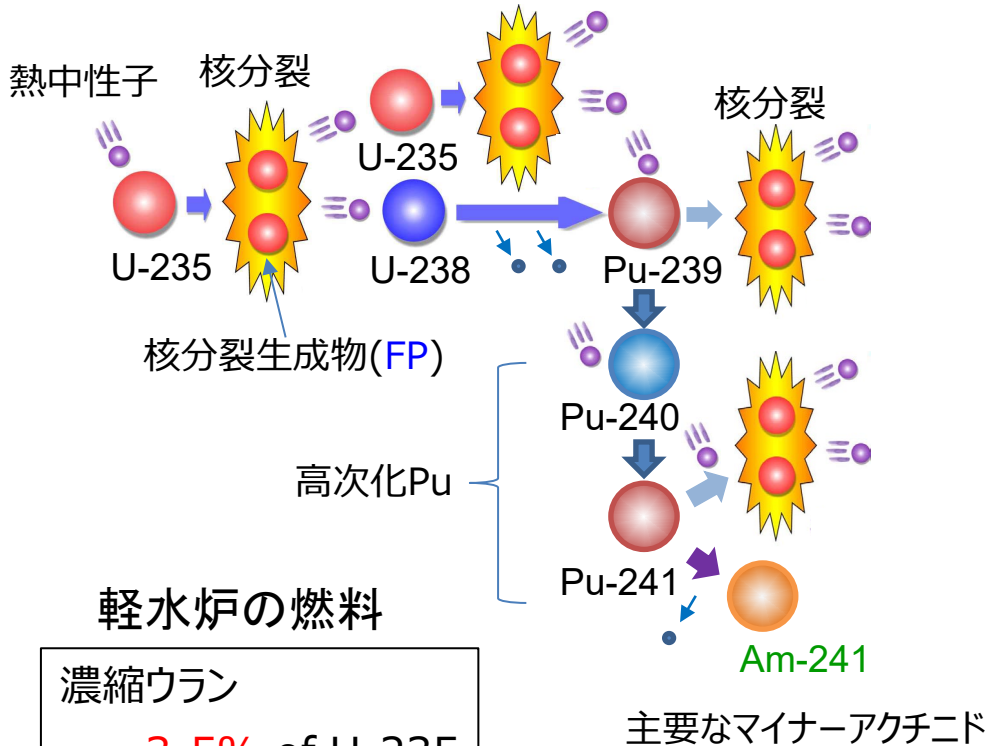
軽水炉内でのウラン燃料の転換



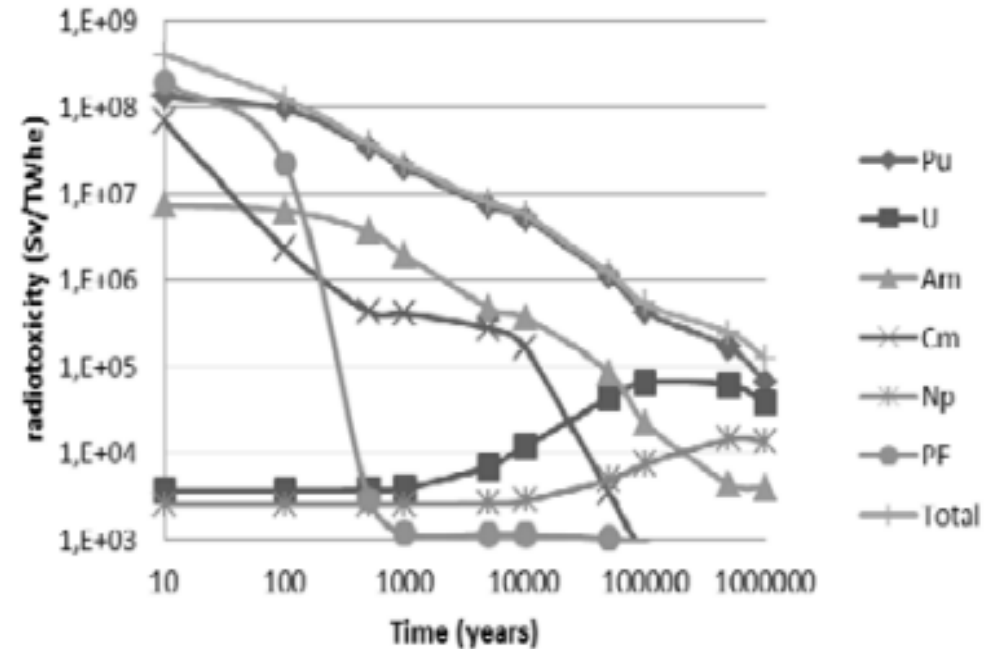
ORIGEN-2 Ver.2.1の計算結果。
棒グラフ中の数字の単位はkg。
(四捨五入の関係で合計があわない場合がある)

軽水炉での核反応と使用済み燃料

● 軽水炉での核反応



● 使用済み燃料の放射性毒性



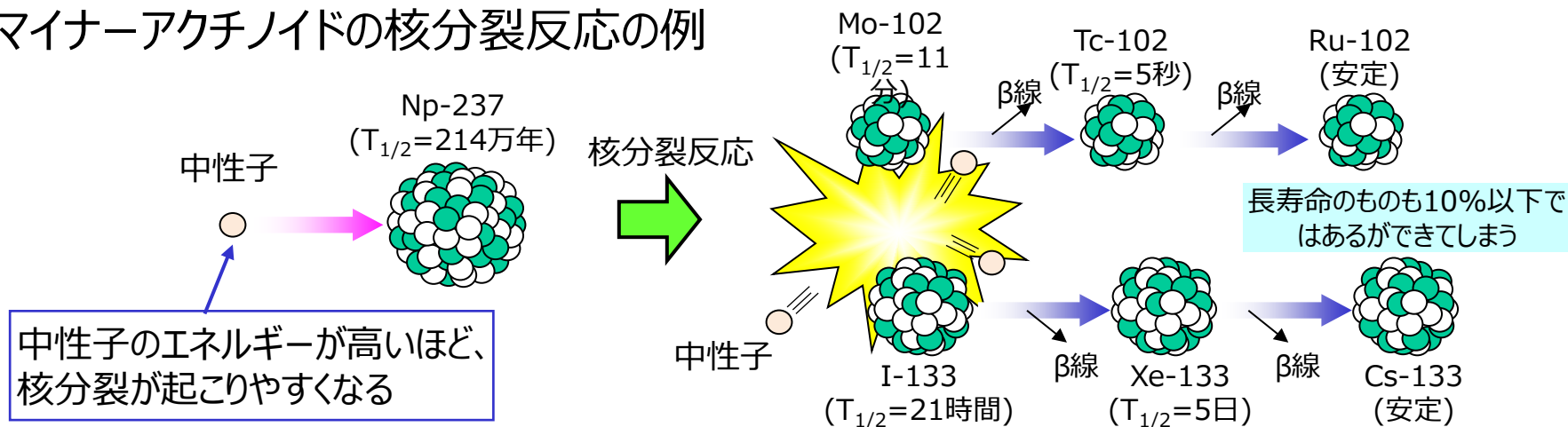
- Beyond plutonium, waste toxicity dominated by Minor Actinides MA (Am, Cm, Np), ~17.5kg/y for 1GWe Reactor
- Americium (Am) is also major source of Heat.

† 出典 : Christophe Poinssot et al. (2012), Main Results of the French Program on Partitioning of Minor Actinides, a Significant Improvement Towards Nuclear Waste Reduction, Procedia Chemistry, Vol. 7, p. 360, Fig. 1, ELSEVIER, <https://doi.org/10.1016/j.proche.2012.10.056>



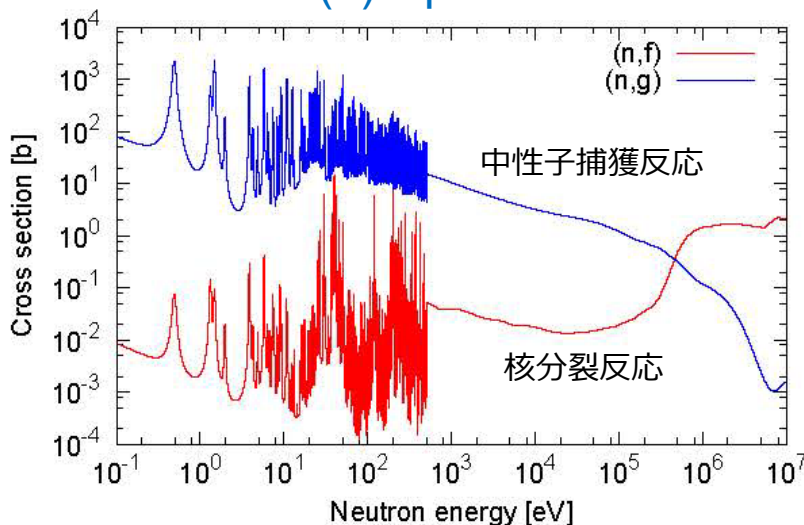
マイナーアクチノイドの燃焼と高速中性子

マイナーアクチノイドの核分裂反応の例



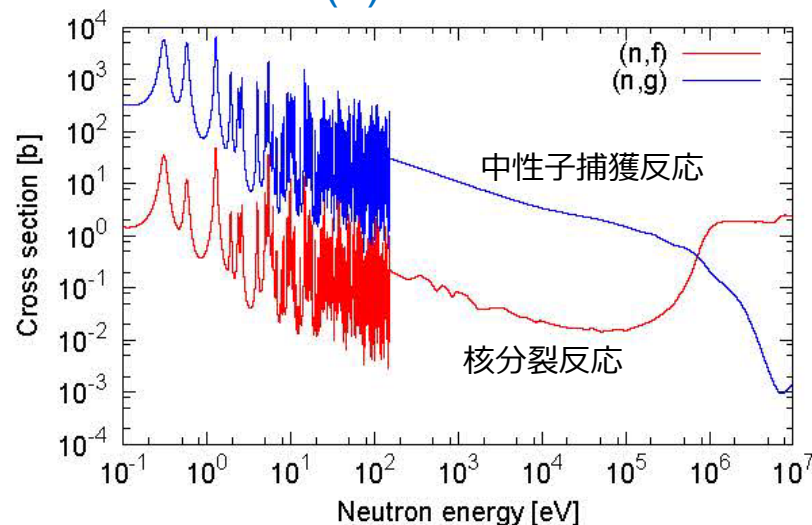
反応断面積 (反応の起こり易さ)

(a) Np-237



中性子のエネルギー

(b) Am-241



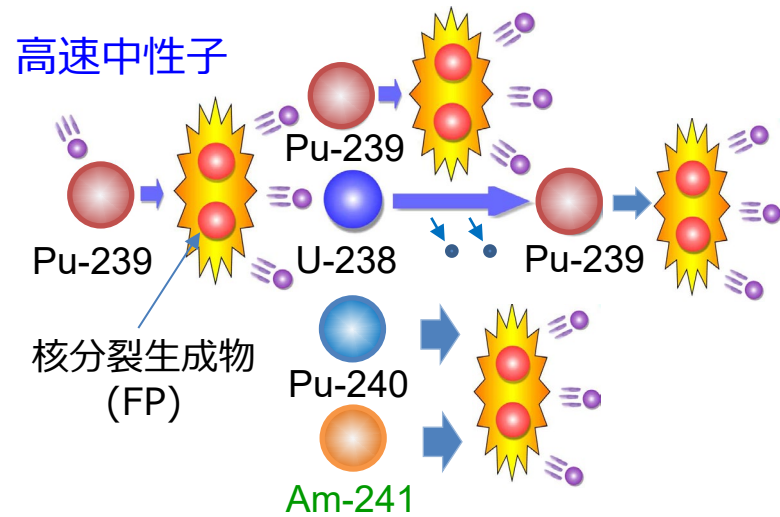
出典：千葉 豪, 炉物理計算で重要となる核データ, p. 4, Fig. 5,
<https://roko.eng.hokudai.ac.jp/wp-content/uploads/2023/07/nucleardata.pdf>

Fig. 5: 長寿命マイナーアクチノイド核種の断面積

高速炉サイクル (エネルギーと資源循環)

高速炉の核反応

● 高速炉の核反応

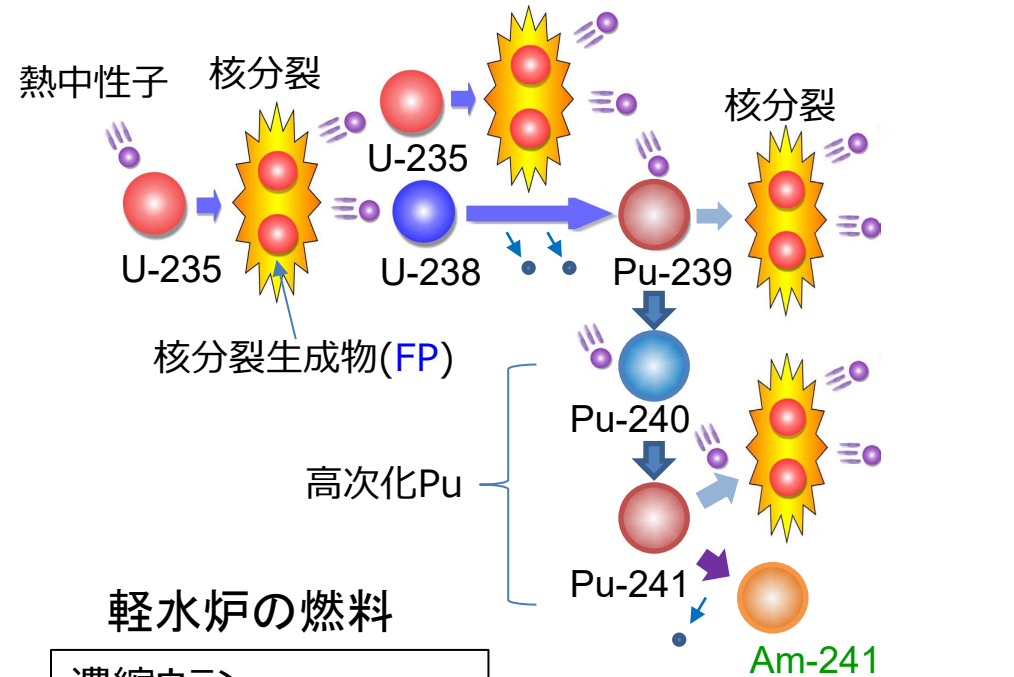


高速炉の燃料

Pu と U の混合酸化物燃料(MOX)

- Pu ~ 20%
- 劣化 U (U-238)
- Minor Actinides (MA) 0 ~ 3%

● 軽水炉での核反応



濃縮ウラン

3-5% of U-235
97-95% of U-238

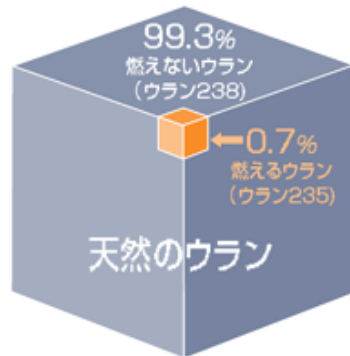
天然ウラン

0.7% of U-235
99.3% of U-238

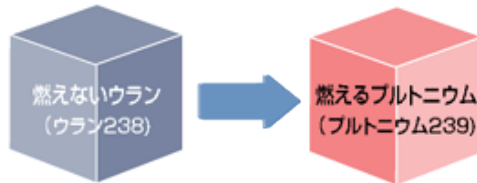
劣化ウラン (U-238)

主要なマイナーアクチニド

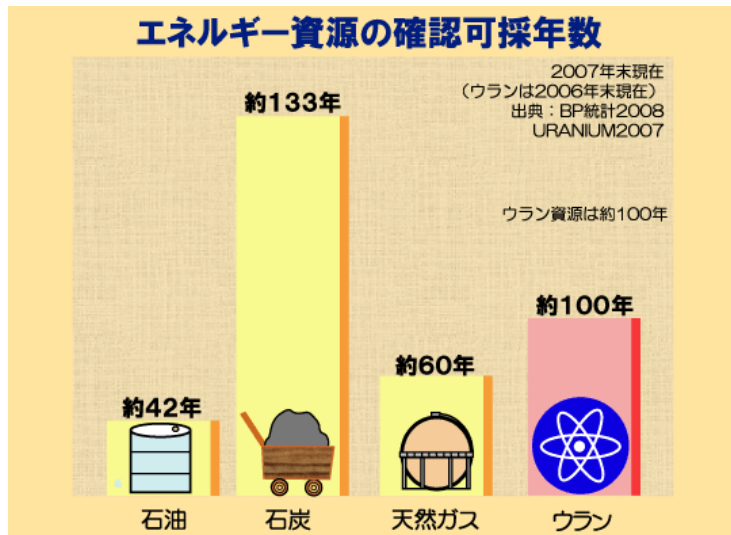
高速炉サイクルの目的（持続可能性）



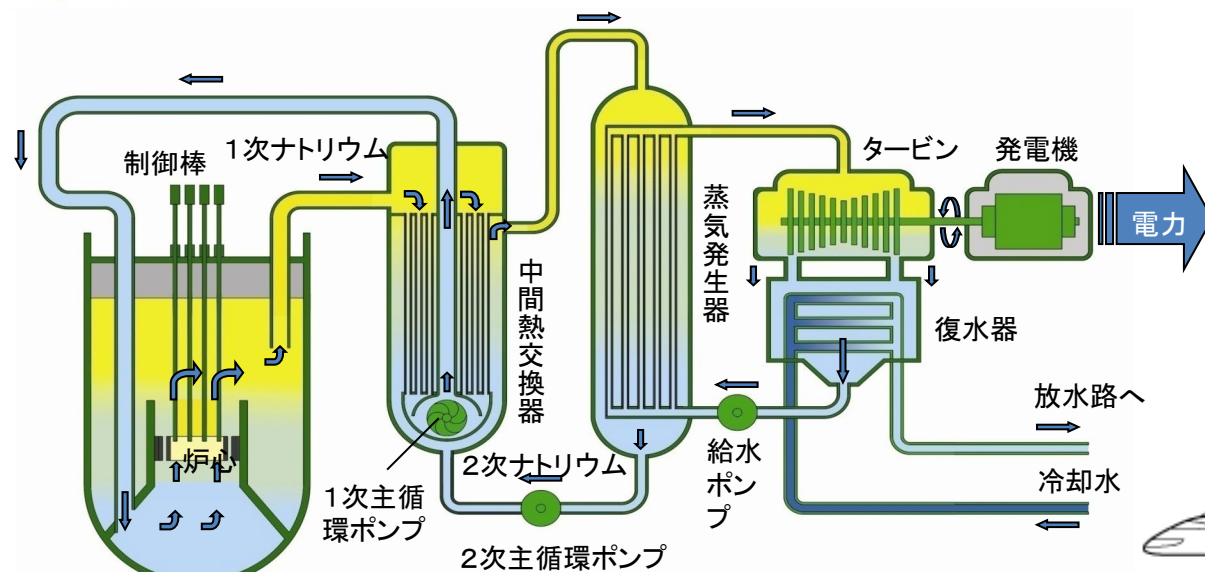
原子炉の中では燃えないウランの一部が変換される



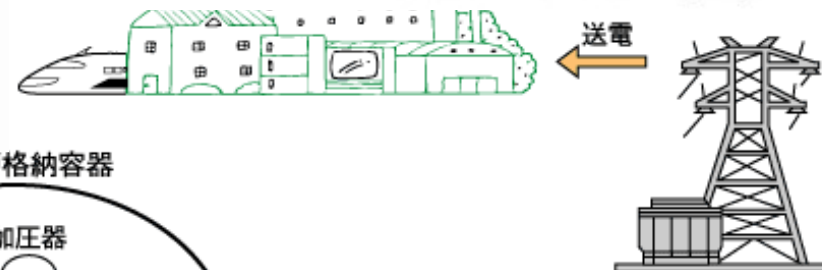
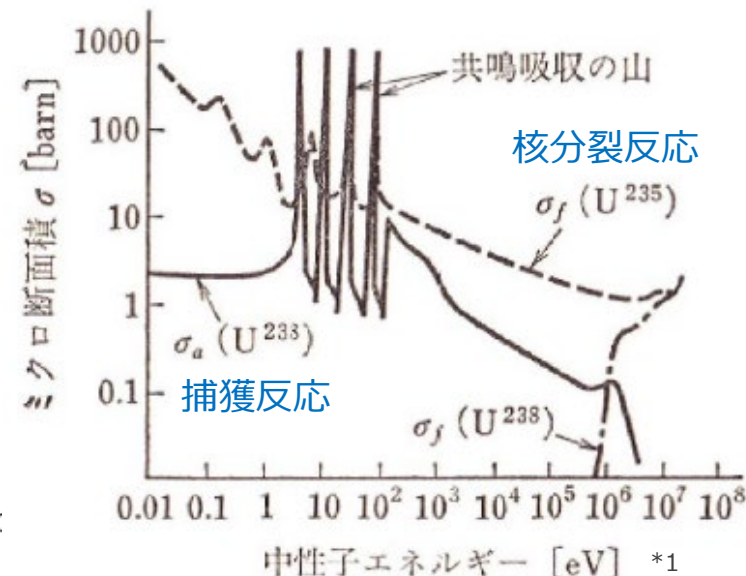
- 軽水炉を含む現在の炉は天然ウランに0.7%含まれているウラン235を燃料としている。
- 高速炉はウラン238を核燃料に変換するため燃料の利用可能な部分はウラン235からウラン全体となるため100倍以上となる。
- ウランは100年程度で確認資源を消費しつつ、ウラン価格高騰の可能性。
- 高速炉の導入により、数世紀の核エネルギー供給が持続可能となる。



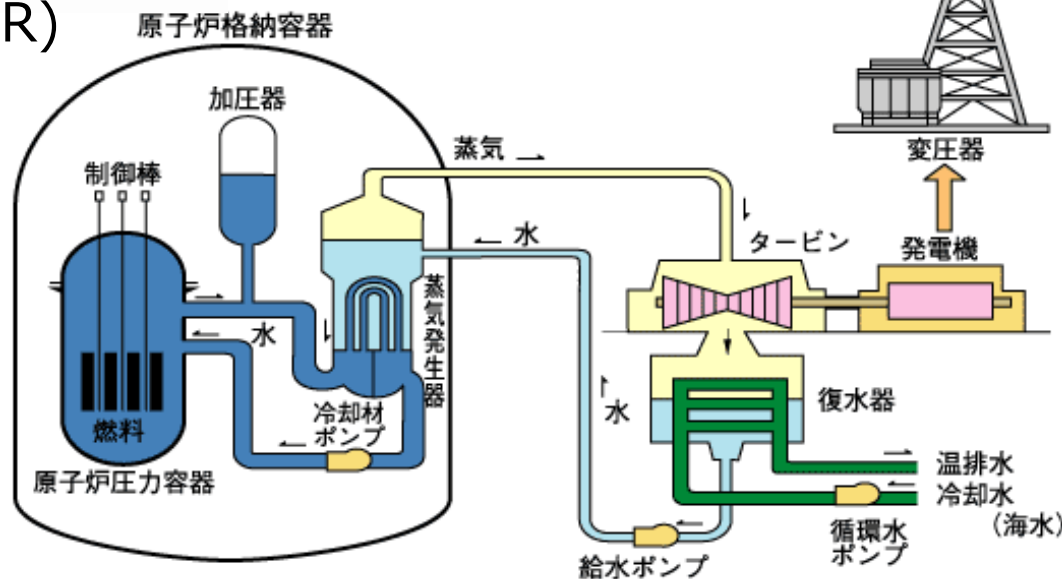
高速炉と軽水炉



ナトリウム冷却高速炉 (SFR)



- 核分裂で生まれる中性子は高いエネルギーをもつ (高速, $\sim 1 \times 10^6$ eV)
- 軽水炉は、燃料を水で冷却し、水を構成する大量の水素原子 (陽子1個) で中性子 (陽子と同じ重さ) を減速する。
- 高速炉は水の代わりに液体ナトリウム (Na)を使う。Naは質量数23で水素よりずっと重く、中性子を減速しにくい。

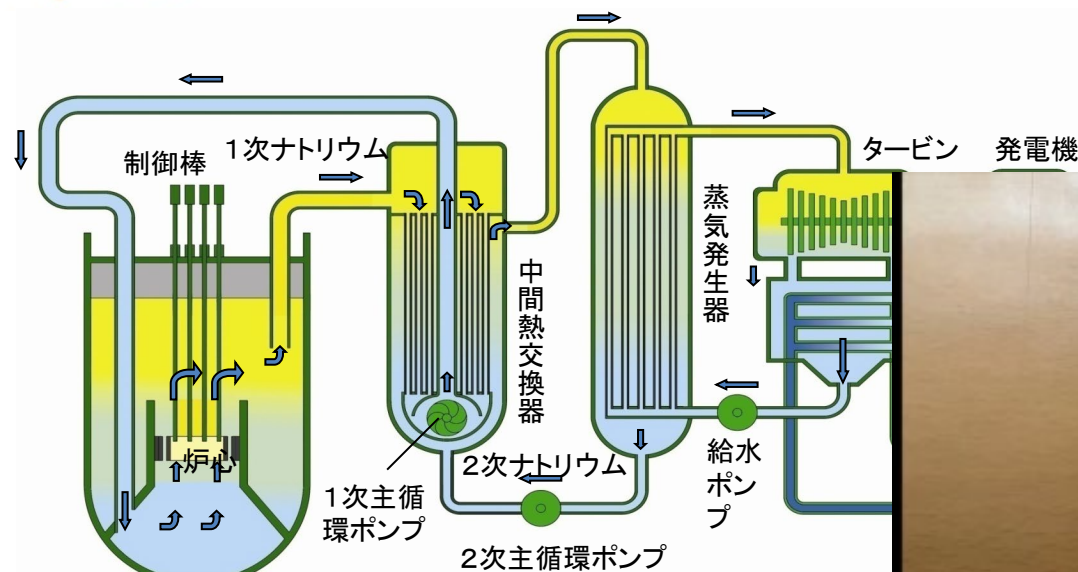


加圧水型軽水炉 (PWR)*2

*1 出典：赤崎正則, 原雅則著 (1986), 電気エネルギー工学, p. 68, 図2.46, 朝倉書店

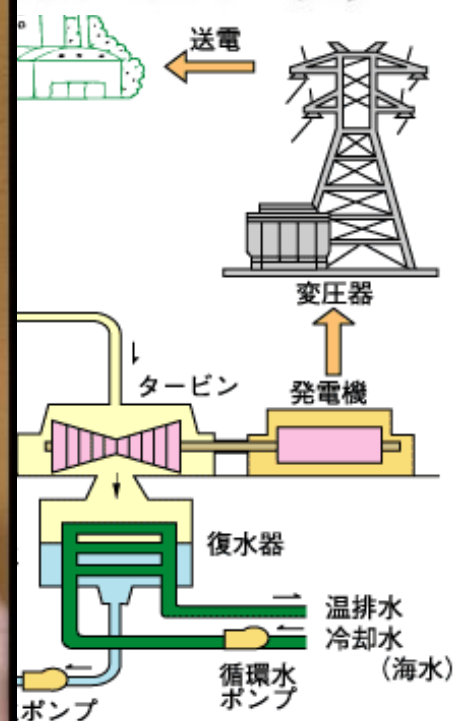
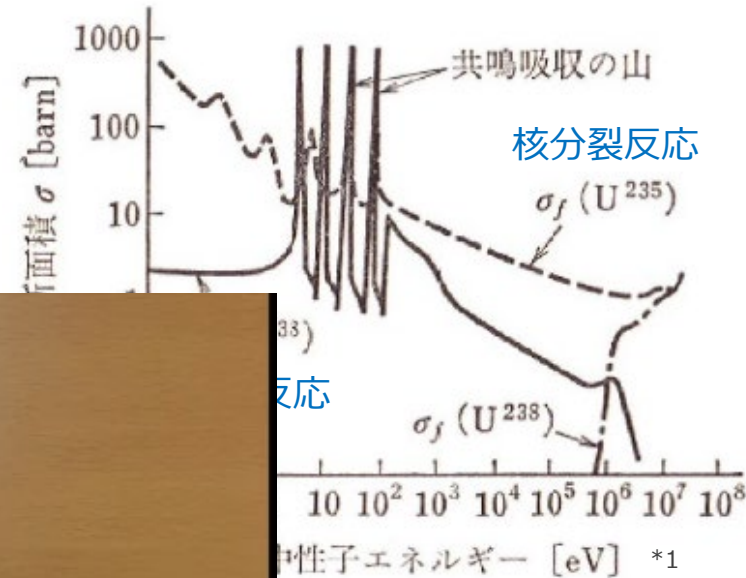
*2 出典：原子力・エネルギー図面集2008, 5-5

高速炉と軽水炉



ナトリウム冷却高速炉 (SFR)

- 核分裂で生まれる中性子は高いエネルギーをもつ (高速, $\sim 1 \times 10^6$ eV)
- 軽水炉は、燃料を水で冷却し、水を構成する大量の水素原子 (陽子1個) で中性子 (陽子と同じ重さ) を減速する。
- 高速炉は水の代わりに液体ナトリウム (Na)を使う。Naは質量数23で水素よりずっと重く、中性子を減速しにくい。



軽水炉 (PWR)*2

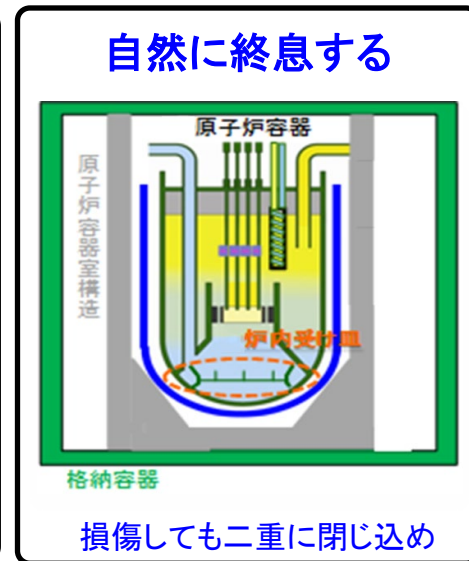
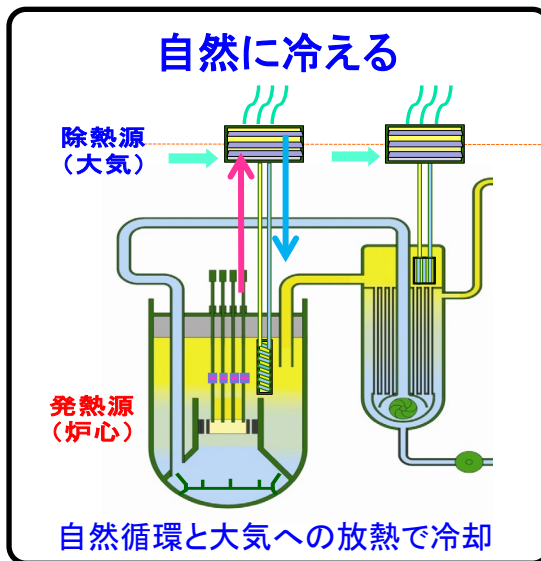
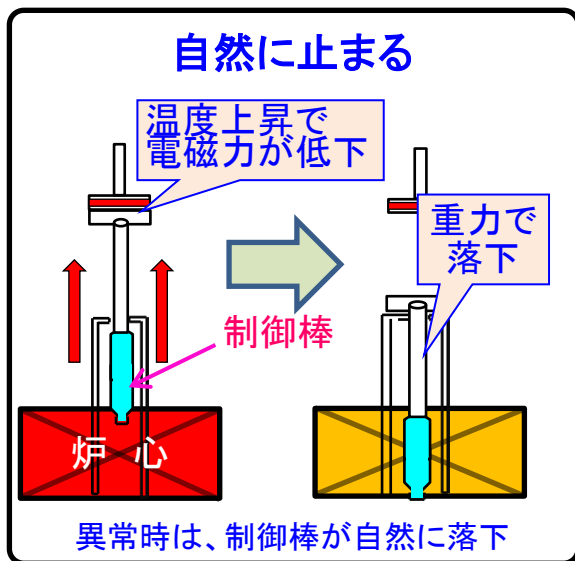
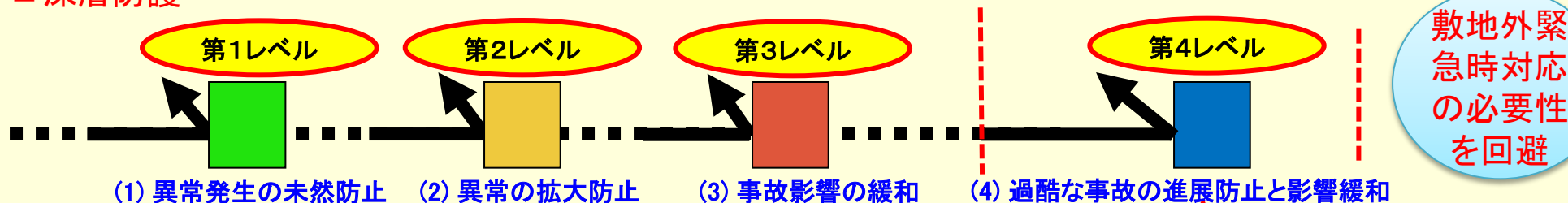
*1 出典：赤崎正則, 原雅則著 (1986), 電気エネルギー工学, p. 68, 図2.46, 朝倉書店

*2 出典：原子力・エネルギー図面集2008, 5-5

安全確保に対するシステム設計の考え方

- 高速炉の特徴を活かし、深層防護に基づく、受動安全を活用した堅牢なシステム
 - 「止める」に加えて、「**自然に止まる**」機能
 - 「冷やす」に加えて、「**自然に冷える**」機能
 - 「閉じ込める」に加えて、炉容器内・格納容器内で「**自然に終息する**」機能

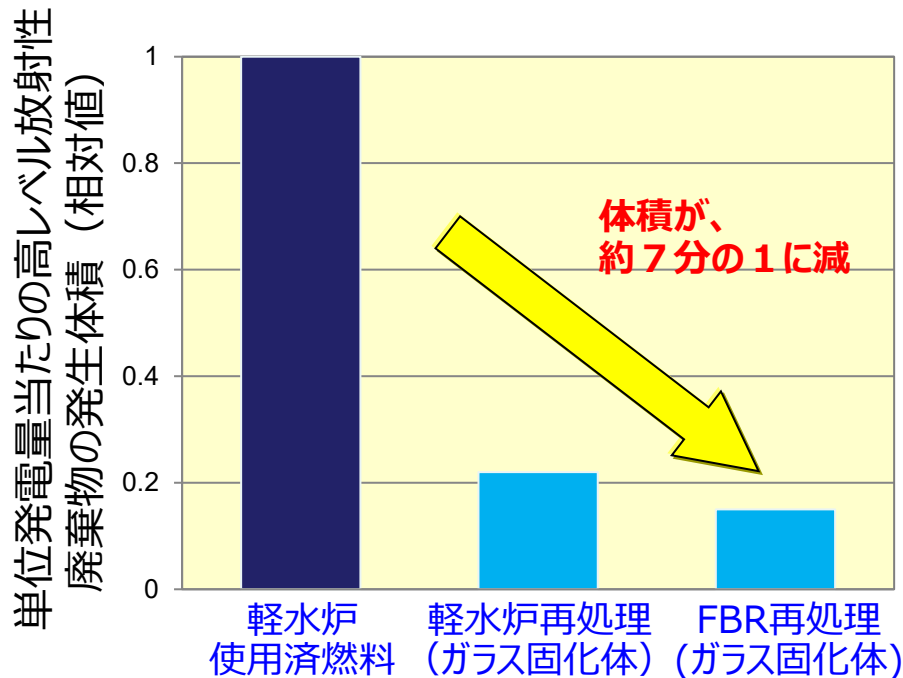
■ 深層防護



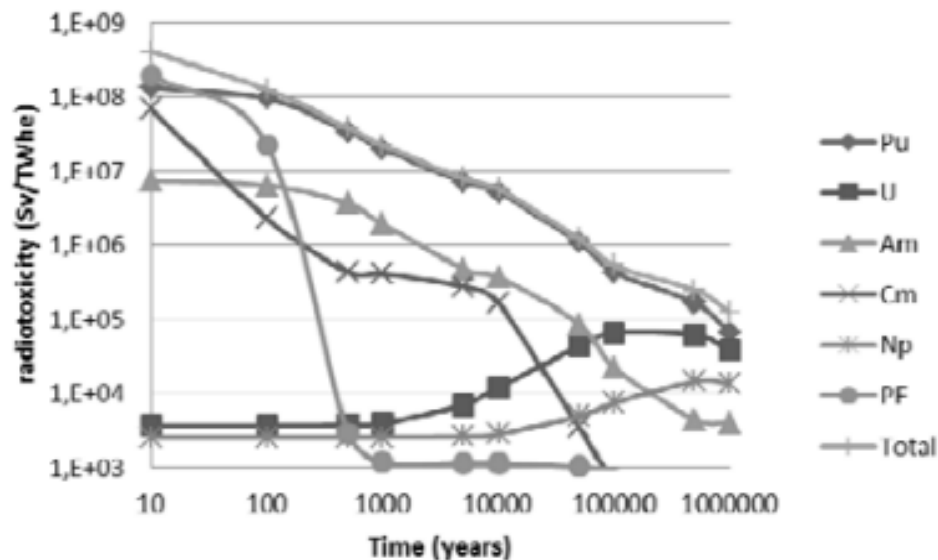
Puの利用と放射性廃棄物の低減

- 高レベル放射性廃棄物の元は使用済み燃料中のPuとマイナーアクチニド（MA）
- 高速炉を使った核燃料サイクル：
 - Puを劣化させずMAを含めて核燃料として利用可能
 - 超長期放射性と発熱核種であるMAを燃料サイクルの中に閉じ込める（地層処分しない）
 - 軽水炉と並行して使うことで、Puを蓄積することなく利用可能
- 最終的にガラス固化体にした時の潜在的有害度、必要な処分場面積を低減

放射性廃棄物の発生量を低減

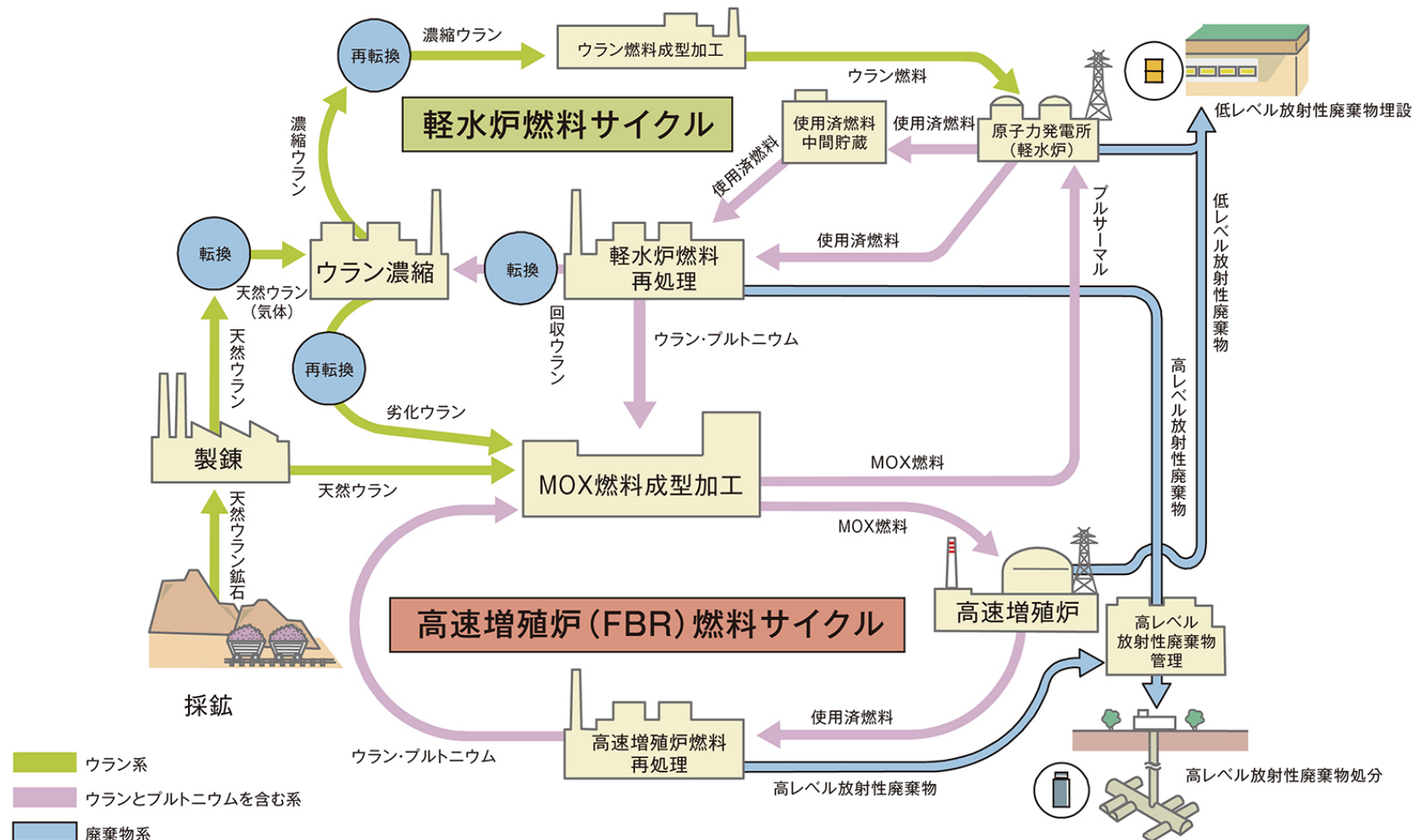


- 軽水炉使用済み燃料の放射性毒性



† 出典：Christophe Poinssot et al. (2012), Main Results of the French Program on Partitioning of Minor Actinides, a Significant Improvement Towards Nuclear Waste Reduction, Procedia Chemistry, Vol. 7, p. 360, Fig. 1, ELSEVIER, <https://doi.org/10.1016/j.proche.2012.10.056>

高速炉を利用した核燃料サイクル

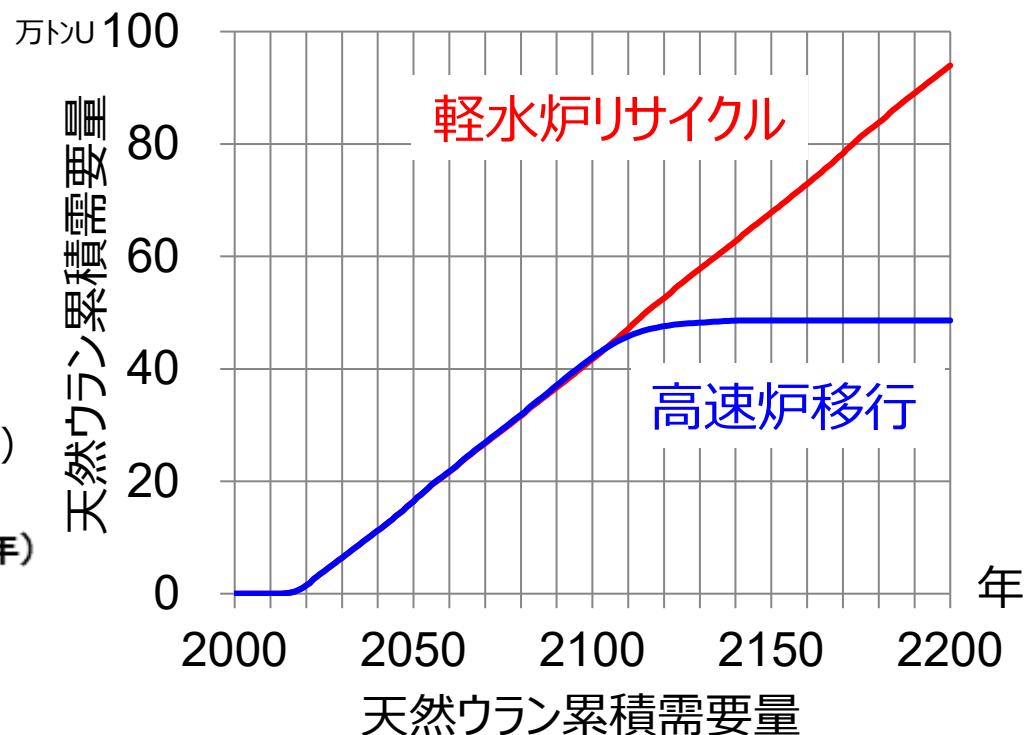
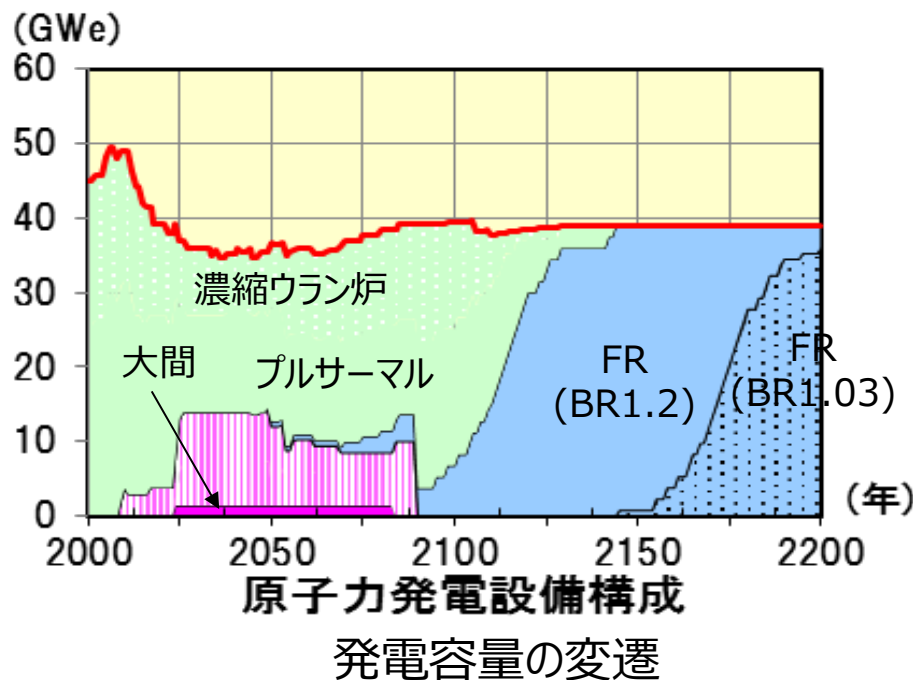


- プルサーマルの使用済み燃料には、軽水炉では再利用し難い高次化PuとMA（マイナーアクチニド）が多く含まれる。
- 高次化Pu、MAを高速炉で再利用する事で資源の循環を支えられる。

増殖性能から見た高速炉の柔軟性

- 世界の原子力発電規模が現状の400GWe程度で維持されたとした場合にも、次世紀はじめには確認資源は消費される可能性があり、それ以前にウラン価格に影響がある可能性がある。
- ウラン燃料の価格等が高騰し閉サイクルに移行する必要性が明らかになり、50年程度で閉サイクルに移行する場合は1.2程度の増殖比*が必要になる。
- 平衡期では増殖比は1.03程度であれば持続的な燃料供給が可能である。

*増殖比：ある期間エネルギーを取り出した前後の核分裂性物質の量の比

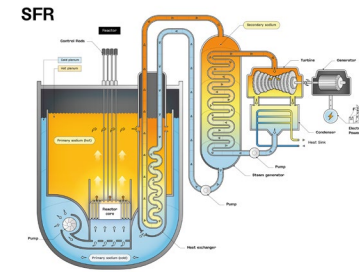


世界の革新炉・高速炉開発

第4世代原子力システム国際フォーラム (GIF)

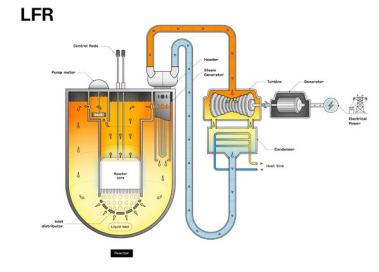
Generation-IV International Forum: 日米仏韓加英中など世界の10か国と1機関 (EU) が加盟し、6炉型の第4世代原子炉の開発を目的に協力する国際協力枠組み

GIF Goals	Specifications
Sustainability 持続可能性	- Sustainable energy generation that meets clean air objectives and provides long-term availability of systems and effective fuel utilization for worldwide energy production. - Minimize and manage their nuclear waste and notably reduce the long-term stewardship burden, thereby improving protection for the public health and the environment.
Economics 経済性	Life-cycle cost advantage over other energy sources.
Safety 安全性と信頼性	- Operations will excel in safety and reliability. Very low likelihood and degree of reactor core damage. Eliminate the need for offsite emergency response.
Proliferation Resistance & Physical Protection (PRPP) 核拡散抵抗性と核物質防護	- Very unattractive for diversion of weapons-usable materials - Increased physical protection against acts of terrorism.



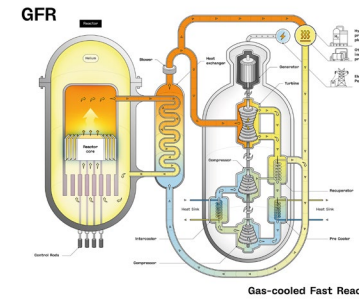
Sodium-cooled Fast Reactor

ナトリウム冷却高速炉



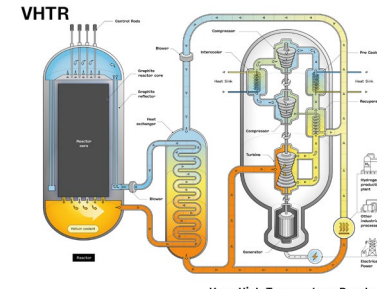
Lead-cooled Fast Reactor

鉛冷却高速炉



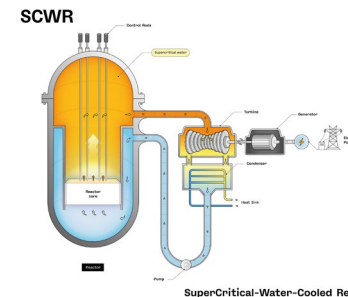
Gas-cooled Fast Reactor

ガス冷却高速炉



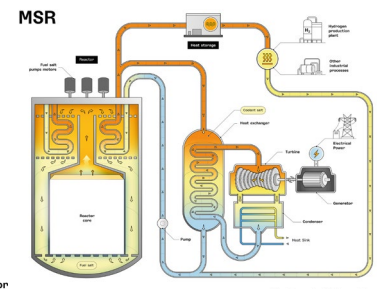
Very-High-Temperature Reactor

超高温ガス炉



SuperCritical-Water-Cooled Reactor

超臨界水冷却炉



Molten Salt Reactor

溶融塩炉

● 国際的な安全設計要件の策定

- 新しい炉概念と既存の安全規制とのギャップ ⇒ **協力して安全設計要件の策定へ**
 - ・ シビアアクシデントの防止と緩和を設計段階で設備・機能として考慮
- IAEAとの連携で国際標準を目指す

● 経済性追求 ⇒ **市場に第4世代炉が受け入れられるための取組**

- 燃料サイクル、高レベル廃棄物の減容を付加価値としてアピール
- 変動再生可能エネルギー（風力、太陽光）に対し、これと調和し、安定かつ信頼性の高い電力網を実現する



GIF Industry Forum with G4SR@Canada, 2022

- 産業界との連携
- 第4世代炉とSMR
- 投資、規制
- 熱利用、熱貯蔵、ハイブリッド電力網

IAEA：新型炉についての取組み

● 小型炉(SMR)に積極的に対応

小型炉: IAEAの定義 30万kWe以下

- SMRの安全設計基準について議論を開始
 - SMR Regulators' Forum (日本の規制委員会も2022年から参加)
 - 現行の軽水炉用安全設計要求(SSR 2/1)のSMRへの適用を検討
 - SMRのEPZ (Emergency Planning Zone) についても議論
- SMRとして水冷却型炉、(高温)ガス冷却型炉の会合等が開催されており、実験施設や安全設計についての協力、加えて人材育成も進められている
 - 例) 第6回TWG-SMRs、ウィーン、Dec. 9-13, 2024.
- Nuclear Harmonization Standardization Initiative (NHSI)
 - SMRを始めとする先進的原子炉設計の標準化や関係する規制活動の調和を図ることにより、その開発と建設を安全・確実に進める。(2022~)

● 国際会議：気候変動と原子力の役割

- 2019年に会議開催、2020, 2022報告
- SMR等、原子力利用の意義づけ

<https://www.iaea.org/atoms4climate>



民間の力を活用したSMR開発:カナダの例

◆ 原子力政策：

- 2023年12月：COP28で「2050年までに世界の原子力発電設備容量を3倍にする」宣言に合意

◆ SMR開発：

- 2018年11月：カナダ政府は「**SMRロードマップ**」を発表（SMR:小型モジュール炉）
- 2020年12月：カナダ政府は「SMRロードマップ」を具体化した「**SMR行動計画**」を発表
- 2022年 3月：カナダ4州^{*1})は「**SMR展開の戦略計画**」を発表

^{*1})オンタリオ（ON）州、サスカチュワン（SK）州、ニューブランズウィック（NB）州、アルバータ（AB）州

- 同計画の中で、SMR技術の開発・建設の推進にかかる3つの方向性を提示

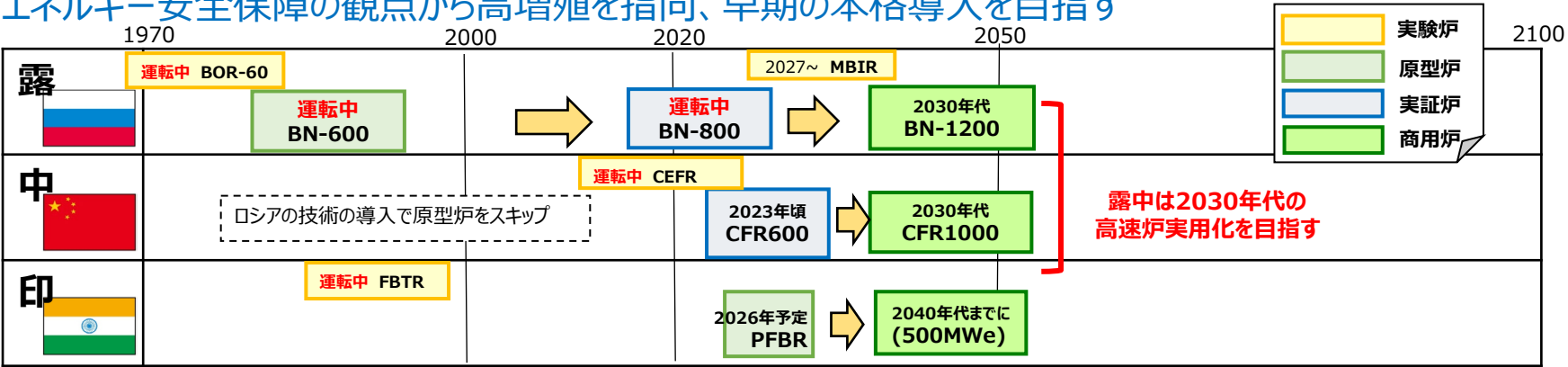
- ① ON州のダーリントン原子力発電所にGE日立の軽水炉SMR **BWRX-300**（30万kWe）を2028年までに建設し、その後SK州に同炉を最大4基建設、最初の1基を2034年に運開
- ② NB州のポイントルプロー原子力発電所敷地内に
 - i. ARC Clean Energy社製の**ナトリウム冷却高速炉ARC-100**（10万kWe、金属U-Zr合金燃料）を2029年までに運転開始し、
 - ii. Moltex Energy社の**燃料ピン型溶融塩炉（SSR-W）**（30万kWe）の実証炉を2030年代初頭までに建設する
- ③ CNL*のチョークリバー・サイト(ON州)に、USNC社製の**小型高温ガス炉MMR**を2028年までに完成させる

* CNL: Canadian Nuclear Laboratories

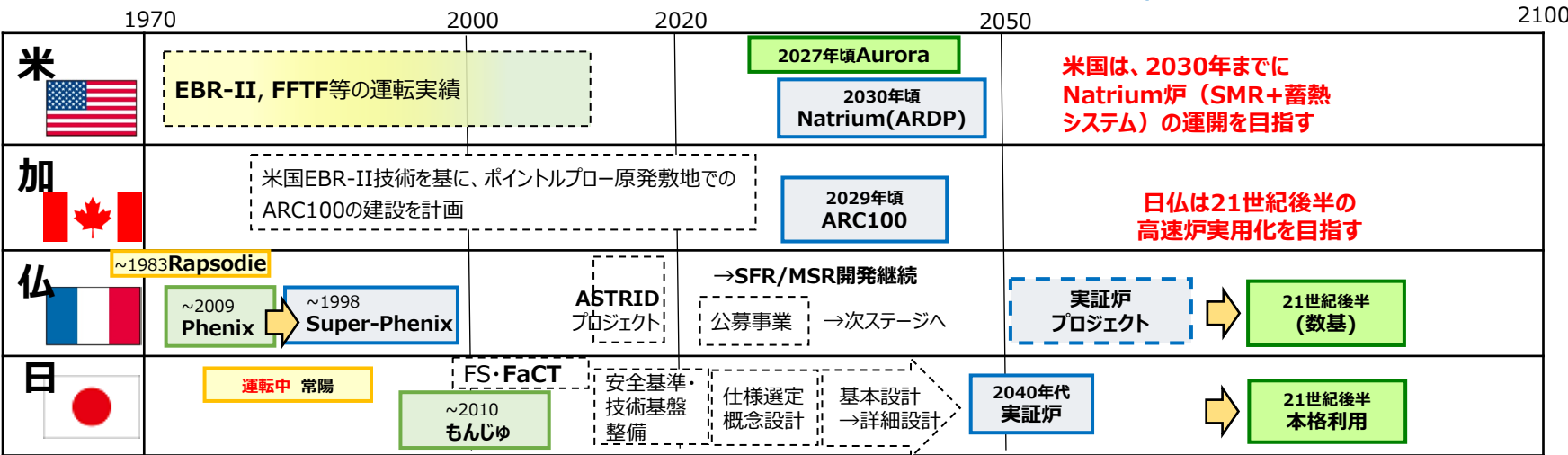
世界の高速炉開発の進展

- ロシアでは**2015年に実証炉が稼働**、中国では2023年時点で実証炉の初臨界を予定。
両国とも2030年代に商用炉運開を目指す
- 米（テラパワー社など）・加（ARC社など）は**2030年頃の実証炉**運転開始を目指して官民連携して挑戦

■ エネルギー安全保障の観点から高増殖を指向、早期の本格導入を目指す



■ 核燃料の増殖技術を習得済み。多目的利用も視野にPu利用・廃棄物対策に主眼



◆ 原子力発電の現状：

- **運転中57基・63.0GWe**(2025年)、全発電量に占める原子力比率65%(2023年)
- 軽水炉使用済ウラン燃料から回収したPuは、**プルサーマルとして利用**(24基でMOX燃料装荷)

◆ 高速炉：実験炉から実証炉まで段階を経て建設・運転（現在、いずれも廃止措置中）



*1

実験炉Rapsodie (4万kWt、ループ型)
1967～1983年



*2

実験炉Phenix (25万kWe、タンク型)
1973～2010年



*3

実証炉Super Phenix (124万kWe、タンク型)
1985～1998年

- **ASTRID計画**：技術実証炉として概念設計（2013～2015年）、基本設計（2016～2019年）

◆ 2022年2月：マクロン大統領は、2050年のネットゼロを達成するため、原子力を推進していくと宣言

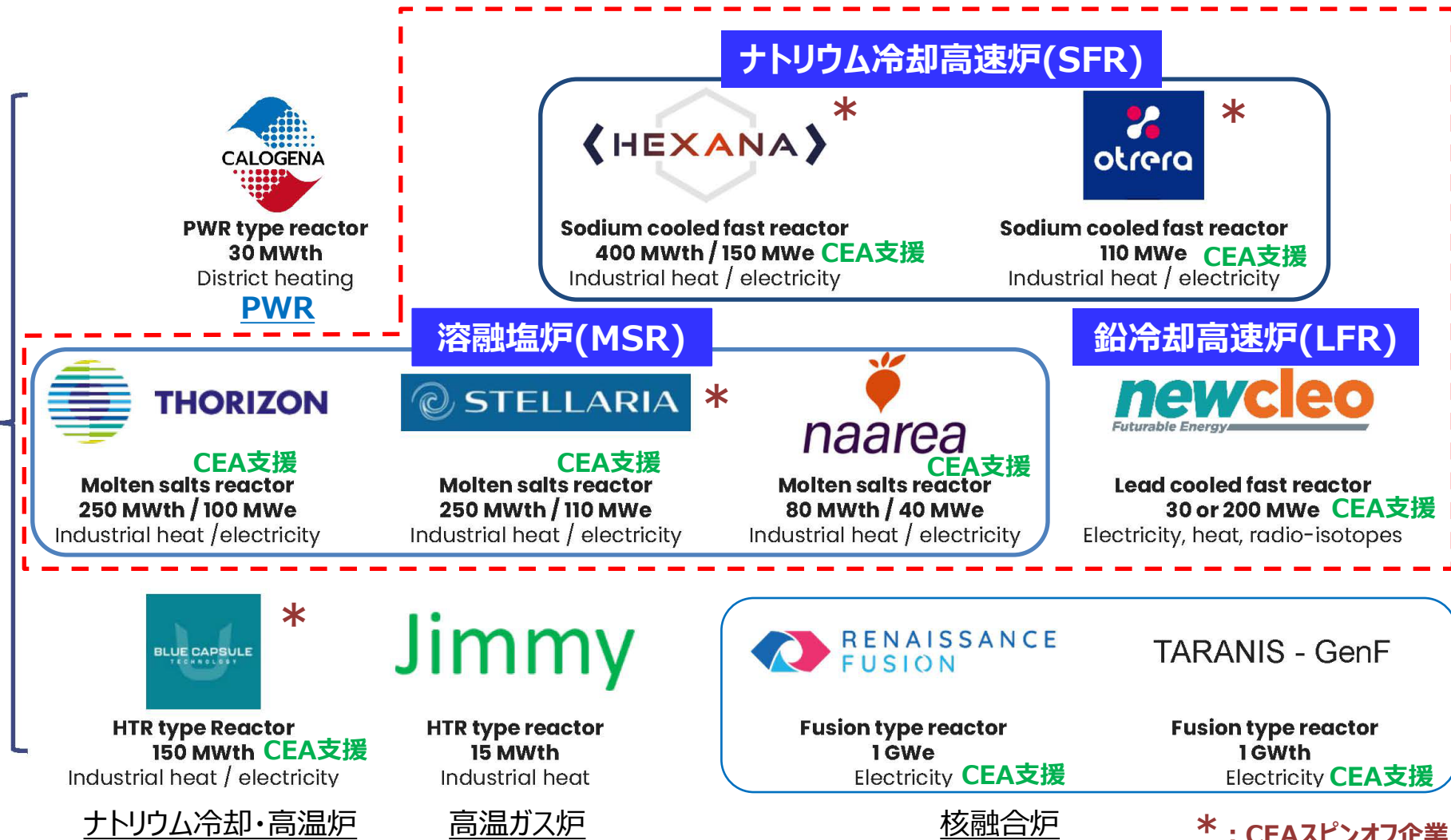
- ✓ 欧州加圧水型炉（EPR 2）の6基建設 + 8基の建設検討、既存原子力発電所の寿命延長
- ✓ **SMR + 革新炉(AMR)の開発**
- 2022年3月：政府による投資計画 **フランス2030「革新的原子炉プロジェクト」**
 - スタートアップ企業が対象の公募事業：電気、熱、**水素**の複合的生産、**クローズド・サイクルの実現**、放射性**廃棄物量**や**放射能の低減**など、フランスの原子力産業の研究開発に画期的な**革新をもたらす小型原子炉の開発**。
- 2025年5月：第3次**エネルギー複数年計画（PPE3）** ※ パブコメを終え、2025年夏までに政令とする予定
 - 原子力に関する9つのActionの一つとして「**クローズド・サイクルと高速炉導入へのロードマップ策定**」を挙げた。

*1 出典：Nicolas Massacret (2021), Etude d'une méthode ultrasonore d'estimation destempératures locales du sodium liquide en sortie cœur RNR-Na, p. 14, Fig. 1-1, HAL

*2 出典：CEA *3 出典：Yann Forget (2007), Wikipedia, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Superph%C3%A9nix.jpg>

➤ フランス2030革新的原子炉プロジェクト

第1段階で11プロジェクトが採択。うち6プロジェクトが高速炉（SFR:2、MSR:3、LFR:1）



* : CEAスピンオフ企業

→ 2025年から開始される第2段階で11プロジェクトからさらに絞り込まれる

◆ 原子力発電の現状 : 世界第1の原子力発電大国

- 運転中94基、96.95GWe（2025年）、全発電量に占める原子力比率約18.5%（2025年）
- 建設中は0基（Georgia州Vogtle4号機（AP1000）2024年3月送電開始）。2013年以降、13基が寿命前に廃炉

† 出典 : World Nuclear Association, <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-power>

◆ 原子力政策

- 2020年10月、新型炉実証プログラム（ARDP）の支援金交付対象にテラパワー社のSFR「Natrium」及びX-エナジー社の高温ガス炉「Xe-100」を選定。7年で32億ドルを投資することを発表
- 2021年11月、DOEは2028年までに「Natrium」の許認可、建設、実証に約20億ドルを投資予定と発表
- 2022年8月：インフレ抑制法（IRA : Inflation Reduction Act）
 - 同法では「エネルギー安全保証と気候変動対策」の分野で税控除や補助金を通じて3,690億ドルを投じる。その内1,603億ドルがクリーン電力に対する税控除で、原子力発電に対しても2024年～2032年まで税控除が適用される（今後建設される新型炉も対象）。
 - 多くの新型炉で利用が見込まれているHALEU燃料については、国内サプライチェーンの開発に資金（7億ドル）を投じる。
- 2023年3月、DOEは、クリーンエネルギー技術の商用化加速に向けた報告書「Pathways to Commercial Liftoff: Advanced Nuclear」を発表。
 - 米国国内の原子力発電設備容量は、先進原子力技術の展開により、2023年の約1億kWeから2050年までに3倍（約3億kWe）まで拡大する可能性があるが、ネットゼロ達成には追加容量が必要であると示唆
- 2025年1月 第2次トランプ政権発足 行政命令「UNLEASHING AMERICAN ENERGY」発令
 - 化石エネルギーに重点を置くも、原子力は環境負荷が低く持続可能なエネルギー源として推進
 - 2021年インフラ投資・雇用法（IIJA）や2022年インフレ削減法（IRA）の下での支援プログラムの見直し
 - ✓ DOEによる原子力に関する支援プログラム（ARDP等）に影響の可能性も
 - 原子力規制緩和の方向性の維持、拡大

新型炉実証プログラム（ARDP）として技術熟度・実用化時期に応じて軽重をつけ、3種類のプランで多様な炉型の実証・開発を支援。

実用化時期

～2028年

革新炉実証

7年以内に稼働する2つの革新炉原子炉の建設を支援

支援額：50%のコストシェアのもと7年間・2炉型で**\$3.2B**

- ① TerraPower社：Natrium(金属燃料ナトリウム冷却高速炉)
- ② X-energy社：Xe-100(ペブルベッド型高温ガス炉)



ナトリウム冷却高速炉
Natrium



高温ガス炉
Xe-100

2030～
2034年

将来的な実証に向けたリスク低減

10～14年後に許認可・実用化される5炉型に対し、技術・運用・規制課題の解決支援
支援額(最大)：**\$303M**

- ① Kairos Power社：ヘルメス試験炉(熔融塩冷却高速炉)
- ② Westinghouse社：eVinci(マイクロ炉)
- ③ BWXT社：BANR(マイクロ炉)
- ④ Holtech社：SMR-160(小型軽水炉)
- ⑤ Southern Company Services社：MCRE(熔融塩炉)



熔融塩冷却高速炉
Kairos Power社



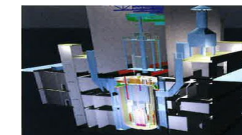
マイクロ炉
eVinci社

2035年～

革新的炉概念2020

2030年代半ばに実用化する可能性のある3炉型に対し設計支援
支援額(最大)：**\$27.5M**

- ① ARC社：ARC-100(ナトリウム冷却高速炉)
- ② General Atomics社：FMR(ヘリウム冷却高速炉)
- ③ MIT：MIGHTR(高温ガス炉)



高速炉
ARC-100



ヘリウム冷却高速炉
General Atomics社

◆ 原子力発電の現状：

- 運転中36基・26.8GWe(その内2基は、ナトリウム冷却高速炉であるBN-600とBN-800)
全発電量に占める原子力比率18.4% (2025年)
建設中4基・3.7GWe、計画14基 (内ナトリウム冷却高速炉1基)・8.9GWe、提案中36基・37.7GWe

◆ ロシアの一人当たりの年間のエネルギー消費量を将来的に欧米並みに倍増させる。

そのためには原子力発電設備容量の増大が必須とし、ロシア型加圧水型原子炉:VVERとナトリウム冷却高速炉:BNの2炉型で対応する方針(Two Component System)。具体的には以下の通り：

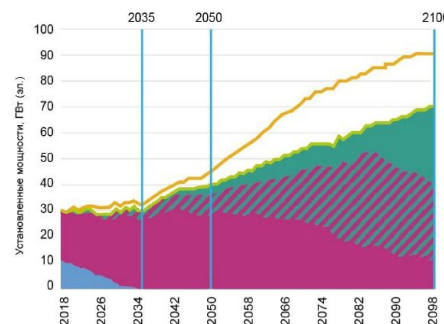
- VVER-1200(1.2GWe級)を中核としつつ、BN-1200(1.22GWe)を2030年代から本格導入
- 2100年に原子力導入規模が70GWeとなる場合、このうち30G~40GWeを高速炉BNとする計画
- 並行してVVERとBNの輸出を計画しており、2080年以降の輸出は全てBNとする計画

◆ 燃料サイクル（燃料製造、再処理）の技術開発も活発であり、クローズド燃料サイクルの実用化に向け、着実に開発を展開中で、2030年頃に高速炉BN-1200と燃料サイクルを実用化予定

- 2022年1月、ロスアトム社は、BN-1200の建設を2035年までに終了する見込みと発表
- 2022年9月、ロスアトム社は、BN-800の全炉心をMOX燃料に移行したと発表
- 2024年7月、ロスアトム社は、BN-800にMA含有MOX燃料の3体の先行照射試験燃料が装荷されたと発表

(注)

- 1GWe=100万kW
- 発電設備容量は
 - ・運転中は、ネット電力(発電所の全発電量から所内消費電力を差し引いた発電量)表示
 - ・建設中・計画中・提案中は、グロス電力(発電所の全発電量)表示



※90GWケースに現在の電力需要予測と建設・廃炉計画を考慮したシナリオ

† 出典：Vyacheslav Pershukov, Russian Chinese cooperation in the field of « Fast reactors and closed nuclear fuel cycle», p. 4, ROSATOM, IAEA,
<https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df18/4.2-V.Pershukov-Russia.pdf>



原子炉上部の写真

● 建設経緯：

- 1984年 基本設計を開始
- 1986年4月のチェルノブイリ事故後の安全基準強化のため開発を中断
- 2006年 主建屋の建設を再開
- 2014年6月27日 初臨界
- 2015年12月 ベロヤルスク原子力発電所の4号機として、初送電
- **2016年5月30日 定格出力達成**
- 2016年10月31日 商業運転開始
- 2020年1月の装荷で述べ18体のMOXを装荷。2020年内にさらに180体のMOXを装荷予定
- **2022年9月 フルMOX炉心に移行**
- **2024年7月 MA含有MOX燃料を初装荷**

● 目的：

- **高速炉を用いたクローズド燃料サイクルの実証**
- 産業が発達しているウラル地方への電力の供給

項目	値
熱出力(万kWt)	210
電気出力(万kWe)	88
冷却ループ数	3
1次冷却系の型式	タンク型
蒸気発生器の型式	ワンスルー型 分割モジュラー形式
最大中性子束密度 ($n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$)	$8.8 \cdot 10^{15}$
燃料	UO ₂ -PuO ₂
最高燃焼度 (%燃焼率)	9.9
炉心入口/出口 ナトリウム温度(°C)	354/547
蒸気発生器入口/出口 ナトリウム温度(°C)	505/309
蒸気発生器入口/出口 水・蒸気温度(°C)	210/490
蒸気圧力(MPa)	13.7
設計寿命(年)	40

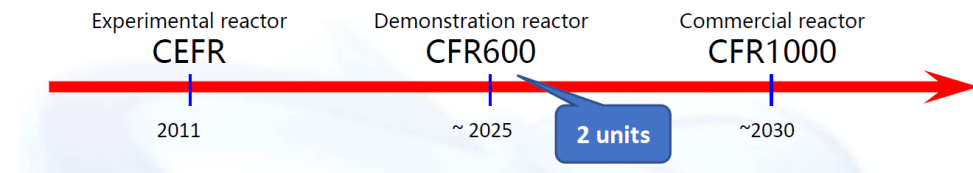
- ◆ 原子力発電の現状：2030年までに世界第1の原子力発電大国の見通し
 - 運転中57基、55.3GWe、全発電量に占める原子力比率約5%（2025年）
 - 建設中32基（内SFR2基）・34.2GWe、計画・提案中193基・220GWe
- ◆ 2009年10月に、ロシアとの協力により、原型炉をスキップして実証炉（BN-800；MOX燃料）を2基導入しつつ、並行して自主開発を進めることにより、早期実用化を目指す方針であった。2013年以降、自主開発を重点化しつつ、その後、ロシア技術の導入により高速炉開発を進める。
- ◆ 中国の高速炉開発は1964年に始まり、ロシアの支援で北京近郊の中国原子能科学研究院（CIEA）で建設された高速実験炉CEFR（20MWe、タンク型）は、2010年7月に初臨界に達して2011年7月に系統へ接続（40%出力）、2014年12月に100%出力達成。
- ◆ 2020年代中頃までに実証炉（CFR600）を導入し、2037年頃に高速炉の実用化を図る計画
- ◆ 技術的にはSFR、MOX燃料、湿式再処理をベースとするが、増殖性の観点から将来的には金属燃料へ移行する方針
- ◆ SFR開発と並行して、加速器駆動炉、鉛冷却高速炉の研究も実施中



高速実験炉 CEFR (20MWe)

†出典：XU MI (2009), Fast Reactor Development for a Sustainable Nuclear Ener, IAEA, https://www-pub.iaea.org/mtcd/meetings/PDFplus/2009/cn176/cn176_Presentations/plenary_session_1/FRP-01.Xu.pdf

中国の高速炉開発戦略



†出典：Fast reactors and related fuel cycles: Status, Prospects and What's Next? (2021), IAEA, <https://nucleus.iaea.org/sites/fr/PublishingImages/Pages/FR22-Web1/FR22-Web1.pdf>

①D. Zhang, "Research, Development and Deployment of Fast Reactor and Related Fuel Cycle in China," FR17, June 26-29, 2016; 一部追記

②Current Status of China Fast Reactor Development Hongyi YANG China Institute of Atomic Energy April 19, 2022

- ◆ 高速実証炉CFR600（0.6GWe、タンク型、MOX燃料）は、1基目が2017年に建設を開始し2023年に運開予定（中国当局の発表がないため、状況不明）。2基目は2020年12月に建設を開始、2026年に運開予定^{(1) (2)}。2030年代に実用炉CFR1000（1000MWe、MOX燃料）を運転開始予定。併行してより高増殖の金属燃料を用いた高速炉を開発していく計画。
- ◆ ロシア国営原子力企業ロスアトム社の子会社で燃料部門のTVEL社は2022年12月、CFR600の初装荷炉心燃料を供給するため、中国への発送を完了⁽³⁾。
- ◆ CFR600を巡っては、2023年10月や12月に運転開始したとの一部報道もある^{(4) (5)}。
- ◆ 原子力産業をハイテク産業と位置づけ国際競争力を高め、「一帯一路」戦略に沿って原子力発電施設等の輸出を積極的に推進中

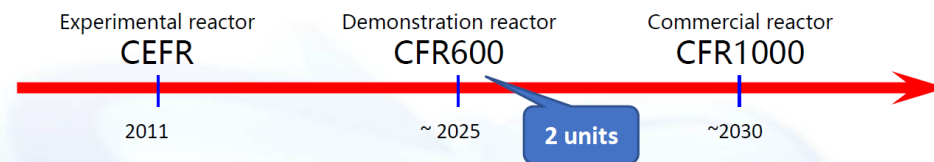


CFR600衛星写真（Google Earth）

✚ 出典：Hui Zhang (2023), IPFM Blog China started operation of its first CFR-600 breeder reactor

- (1) 電気事業連合会：「[中国] 中国が福建省で2基目のCFR-600高速中性子炉の建設を開始」, 2021年1月。URL：https://www.fepc.or.jp/library/kaigai/kaigai_topics/1260332_4115.html
- (2) IPFM BLOG：「Russian laws prohibit military use of HEU supplied to China」, May 2024。URL：https://fissilematerials.org/blog/2024/05/russian_export_laws_prohi.html
- (3) TVEL：「TVEL ships fuel for China's CFR-600 fast reactor launch」, Dec. 2022。URL：https://tvel.ru/en/press-center/news/?ELEMENT_ID=10198
- (4) 笹川平和財団：「中国の高速増殖炉が稼働か：核軍拡加速のおそれ」, 2023年10月。URL：<https://www.spf.org/spf-china-observer/eisei/eisei-detail006.html>
- (5) IPFM BLOG：「China started operation of its first CFR-600 breeder reactor」, Dec. 2023。URL：https://fissilematerials.org/blog/2023/12/china_started_operation_o.html

中国の高速炉開発戦略

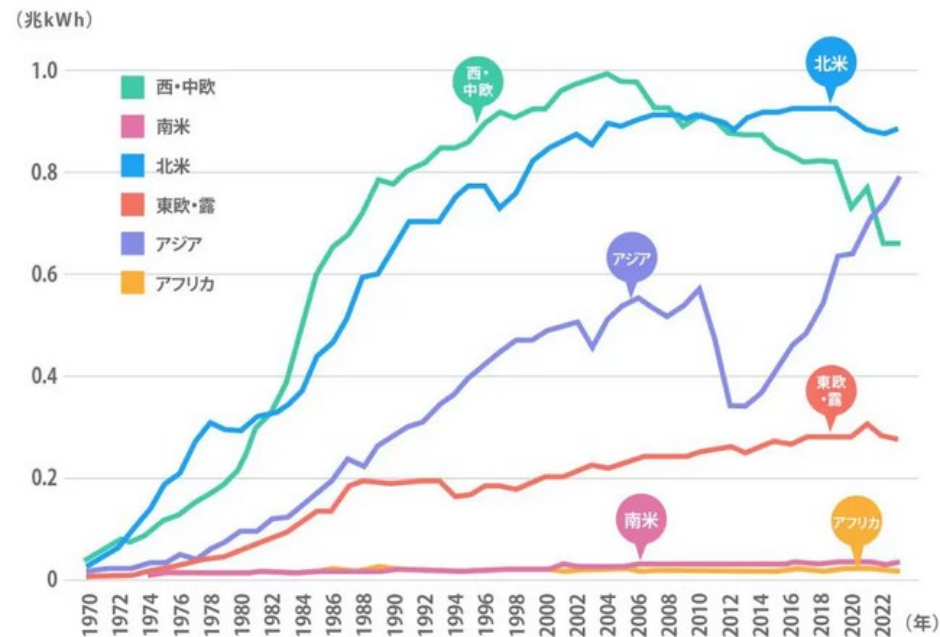


✚ 出典：Fast reactors and related fuel cycles: Status, Prospects and What's Next? (2021), IAEA, <https://nucleus.iaea.org/sites/fr/PublishingImages/Pages/FR22-Web1/FR22-Web1.pdf>

- ① D. Zhang, "Research, Development and Deployment of Fast Reactor and Related Fuel Cycle in China," FR17, June 26-29, 2016; 一部追記
- ② Current Status of China Fast Reactor Development Hongyi YANG China Institute of Atomic Energy April 19, 2022

- 発電炉への多面的安全要求の高まり
⇒ 規制要求強化、建設コスト等増大、国際標準化希求
- 変動再生可能エネルギー導入機運台頭 & 本格化
⇒ 電力網再編、蓄エネ、出力調整機能要求、開発意義の優先性変化
- 開発中心国の変動(ロシア、中国、インド)
⇒ 一国(単独)開発の限界、技術占有・偏域懸念、国際協働提唱
- 原子力発電プラント開発・必要性再評価
⇒ 民間活力掘り起し、技術イノベーション、SMR開発意義議論
- SMRを始め、新型炉の規制にむけて世界的な動き

図2. 世界の原子力発電電力量の推移 (地域別)



次世代革新炉の現状と今後について（日本）

第8回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会
革新炉ワーキンググループ

2024年10月22日

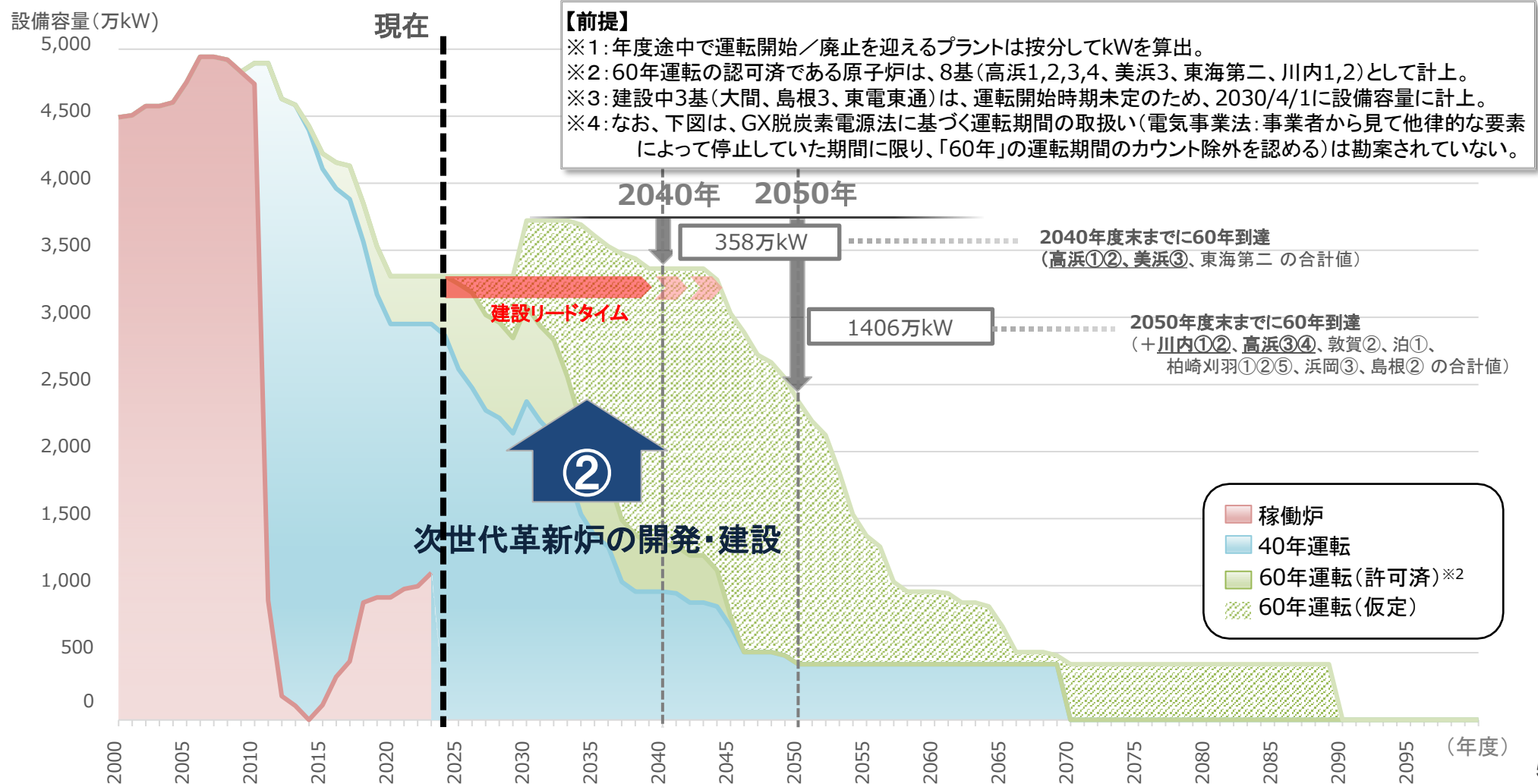
資料1 次世代革新炉の現状と今後について（事務局提出資料）より、以下抜粋

②次世代革新炉の開発・建設



出典：原子力に関する動向と課題・論点（令和6年6月25日），資源エネルギー庁，
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/pdf/039_01_00.pdf

- **GX推進戦略**（昨年7月閣議決定）では、「**原子力の安全性向上を目指し、新たな安全メカニズムを組み込んだ次世代革新炉の開発・建設に取り組む**」、「**地域の理解確保を大前提に、廃炉を決定した原発の敷地内での次世代革新炉への建て替え**」を対象として、具体化を進めていくとされている。



「第7次エネルギー基本計画」（令和7年2月18日 閣議決定）

※原子力関係部分抜粋

1. 東京電力福島第一原子力発電所事故後の歩み

- 東日本大震災及び東京電力福島第一原子力発電所事故からまもなく14年が経過するが、東京電力福島第一原子力発電所事故の経験、反省と教訓を肝に銘じて取り組むことが、引き続きエネルギー政策の原点。
- 足下、ALPS処理水の海洋放出、燃料デブリの試験的取出し成功等の進捗や、福島イノベーション・コースト構想の進展もあり、オンサイト・オフサイトともに取組を進めているところ。政府の最重要課題である、福島の復興・再生に向けて最後まで取り組んでいくことは、引き続き政府の責務である。

2. 第6次エネルギー基本計画策定以降の状況変化

- 他方で、第6次エネルギー基本計画策定以降、我が国を取り巻くエネルギー情勢は、以下のように大きく変化。こうした国内外の情勢変化を十分踏まえた上でエネルギー政策の検討を進めていく必要。
 - － ロシアによるウクライナ侵略や中東情勢の緊迫化などの経済安全保障上の要請が高まる。
 - － DXやGXの進展に伴う電力需要増加が見込まれる。
 - － 各国がカーボンニュートラルに向けた野心的な目標を維持しつつも、多様かつ現実的なアプローチを拡大。
 - － エネルギー安定供給や脱炭素化に向けたエネルギー構造転換を、経済成長につなげるための産業政策が強化されている。

3. エネルギー政策の基本的視点（S+3E）

- エネルギー政策の要諦である、S+3E（安全性、安定供給、経済効率性、環境適合性）の原則は維持。
- 安全性を大前提に、エネルギー安定供給を第一として、経済効率性の向上と環境への適合を図る。

<総論>

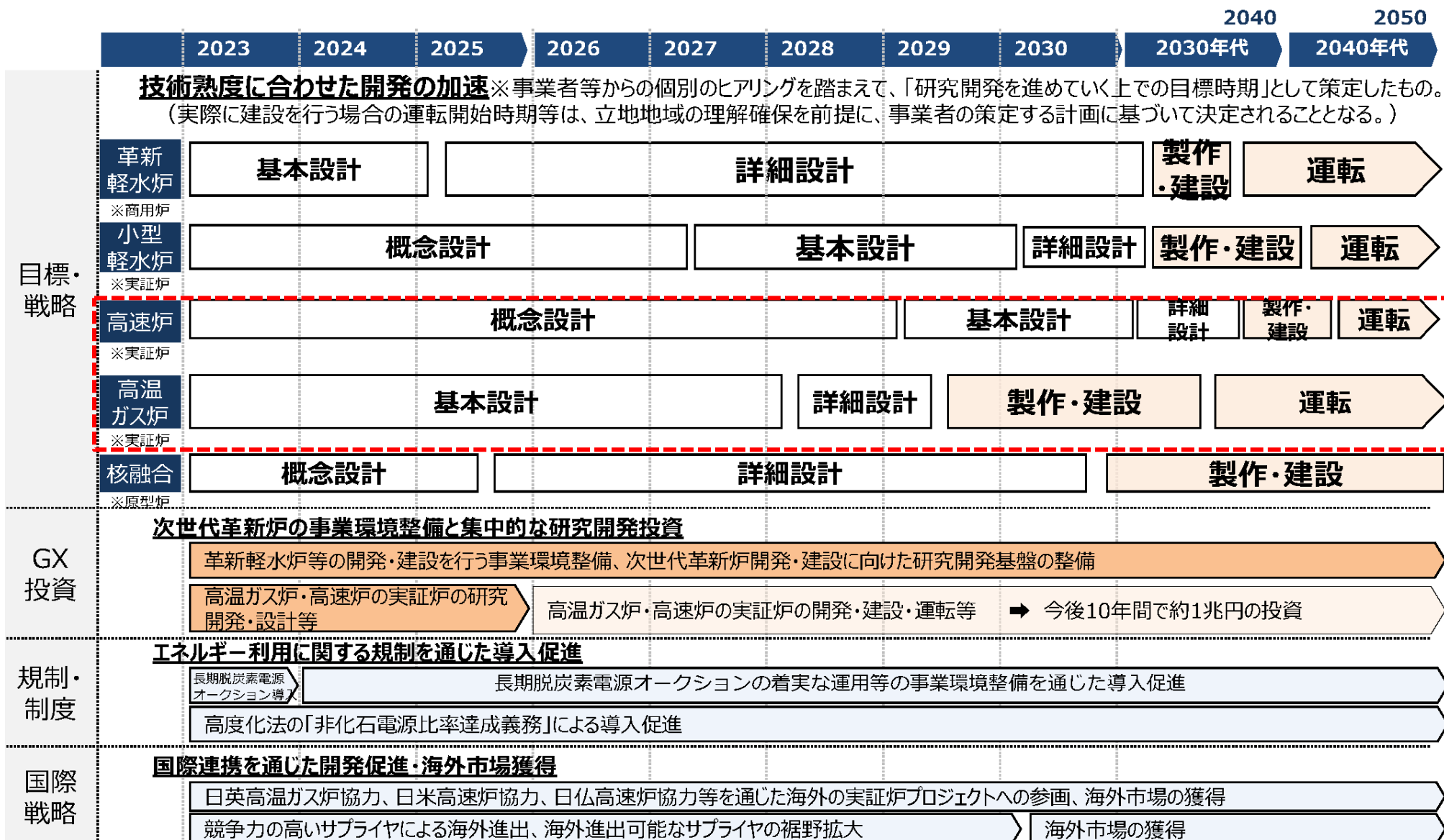
- DXやGXの進展に伴い、電力需要の増加が見込まれる中、それに見合った脱炭素電源の確保ができなかったために、国内産業立地の投資が行われず、日本経済が成長機会を失うことは、決してあってはならない。
- 再生可能エネルギーか原子力かといった二項対立的な議論ではなく、再生可能エネルギーや原子力などの脱炭素電源を最大限活用することが必要不可欠。
- こうした中で、脱炭素電源への投資回収の予見性を高め、事業者の積極的な新規投資を促進する事業環境整備及び、電源や系統整備といった大規模かつ長期の投資に必要な資金を安定的に確保していくためのファイナンス環境の整備に取り組むことで、脱炭素電源の供給力を抜本的に強化していく必要がある。

<原子力>

- 原子力は、優れた安定供給性、技術自給率を有し、他電源と遜色ないコスト水準で変動も少なく、また、一定出力で安定的に発電可能等の特長を有する。こうした特性はデータセンターや半導体工場等の新たな需要 ニーズにも合致することも踏まえ、国民からの信頼確保に努め、安全性の確保を大前提に、必要な規模を持続的に活用していく。
- 立地地域との共生に向けた政策や国民各層とのコミュニケーションの深化・充実、核燃料サイクル・廃炉・最終処分といったバックエンドプロセスの加速化を進める。
- 再稼働については、安全性の確保を大前提に、産業界の連携、国が前面に立った理解活動、原子力防災対策等、再稼働の加速に向け官民を挙げて取り組む。
- 新たな安全メカニズムを組み込んだ次世代革新炉の開発・設置については、地域の産業や雇用の維持・発展に寄与し、地域の理解が得られるものに限り、廃炉を決定した原子力発電所を有する事業者の原子力発電所の サイト内での次世代革新炉への建て替えを対象として、六ヶ所再処理工場の竣工等のバックエンド問題の進展も踏まえつつ具体化を進めていく。その他の開発などは、各地域における再稼働状況や理解確保等の進展等、今後の状況を踏まえて検討していく。
- 次世代革新炉（革新軽水炉・小型軽水炉・高速炉・高温ガス炉・フュージョンエネルギー）の研究開発等を進めるとともに、サプライチェーン・人材の維持・強化に取り組む。

【今後の道行き】 事例 16 : 次世代革新炉

- 安全性の確保を大前提として、新たな安全メカニズムを組み込んだ次世代革新炉の開発・建設に取り組む。



高速炉実証炉開発事業

- 2023年3月、炉概念の仕様と将来的にはその製造・建設を担う事業者（中核企業）の公募を実施、7月12日の高速炉開発会議戦略ワーキンググループにおいて、炉概念として三菱FBRシステムズ株式会社が提案する『ナトリウム冷却タンク型高速炉』を、中核企業として三菱重工業株式会社を選定して、GX経済移行債を活用した実証炉開発事業を9月から開始。
- 2024年7月、炉と燃料サイクルの研究開発全体を一定のレベルまで完遂するとともに、両者を統合して基本設計に繋げていく機能（研究開発統合機能）を担う組織として、高速炉サイクルプロジェクト推進室をJAEAに設立。当該プロジェクト推進室による開発作業マネジメントの下、設計・研究開発に取り組んでいる。

＜ナトリウム冷却タンク型高速炉（イメージ）＞

＜高速炉実証炉開発の今後の作業計画＞

2023 年夏：炉概念の仕様を選定 【23/7/12選定済】

2024 年度～2028 年度：実証炉の概念設計・研究開発

2026年度頃：燃料技術の具体的な検討

2028 年度頃：実証炉の基本設計・許認可手続きへの移行判断

※戦略ロードマップ（令和4年12月23日 原子力関係閣僚会議）を基に作成



経済産業省受託事業「令和元年度高速炉の国際協力等に関する技術開発」の成果を含む

出典：経済産業省受託事業「令和元年度高速炉の国際協力等に関する技術開発」の成果を含む
ナトリウム冷却タンク型高速炉, 三菱重工業株式会社

高温ガス炉実証炉開発事業

- 2023年3月、基本設計を実施するとともに将来的にはその製造・建設を担う事業者（中核企業）の公募を実施、第三者の有識者で構成される技術評価委員会にて審査の結果、2023年7月25日中核企業として三菱重工業株式会社を選定して、GX経済移行債を活用した実証炉開発事業を8月から開始。
- 2024年3月、試験炉HTTRにて出力100%の状態から急遽停止する安全性実証試験を実施。高温ガス炉の固有の安全性を立証した。
- HTTRへの水素製造施設の接続に向けて、2025年3月、原子炉設置変更許可を申請。

<高温ガス炉(イメージ)>

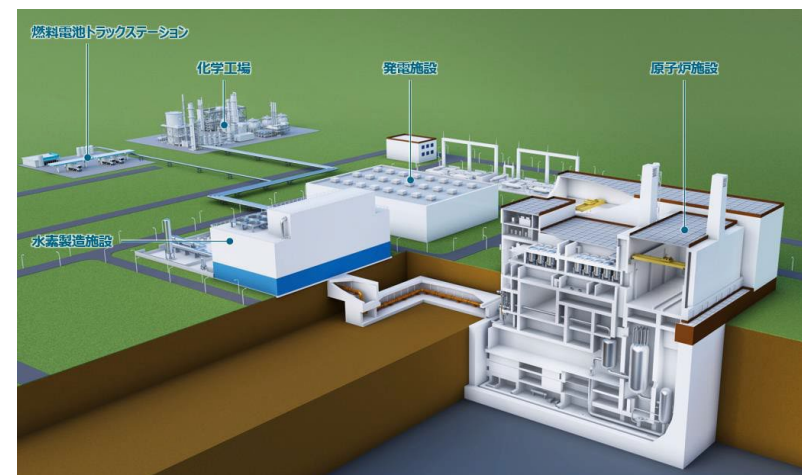
<高温ガス炉実証炉 今後の開発の作業計画>

事業開始～2030 年度:実証炉の基本設計・詳細設計

2030年度～2030年代後半:許認可の取得、建設、据付

2030年代後半:運転開始

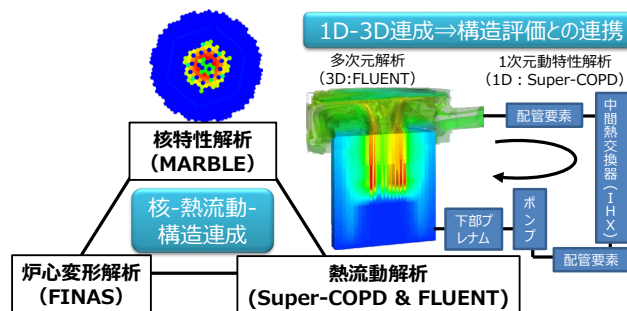
※革新炉開発の技術ロードマップ(令和4年11月2日 革新炉ワーキンググループ)を基に作成



原子力機構での 高速炉サイクル研究開発

原子力機構での高速炉サイクル研究開発

○安全性＋経済性：核・熱・構造の課題解決



設計・建設知見の反映
もんじゅ知識ベース

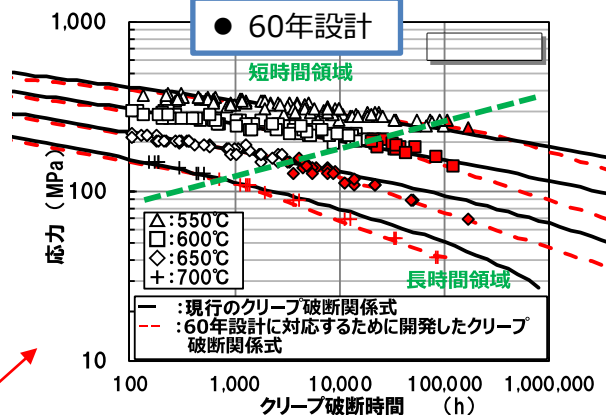
高品質の実験検証
ナトリウム試験

○機器の性能・信頼性実証、設計評価手法の総合検証



冷却系機器開発試験施設 (AtheNa)

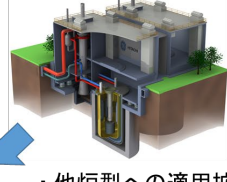
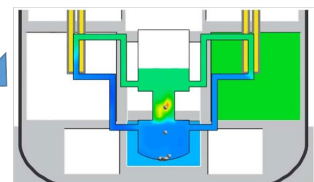
○構造・材料の規格・基準、維持規格



○シビアアクシデント評価：炉心物質移行



- ・モデル拡張 (炉心損傷、熱水力)
- ・ユーザー利便性向上



- ・他炉型への適用拡張 (PRISM型炉)

・評価精度向上 (融体熱物性)



統合安全性評価シミュレーション基盤システム

ナトリウム燃焼評価

○原子力のさらなる技術革新

- ・脱炭素に向けた原子力の蓄熱・熱利用技術
- ・浮体免震技術による立地自由度向上
- ・3D-Printingによる高い自由度をもつ燃料製造
複雑な燃料製造プロセスの一元化
自動化、形状管理、傾斜材料・・・

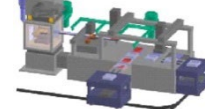
○実用炉向け燃料開発



炉心材料の許認可・照射データ

○高速炉燃料製造技術

簡素化ペレット法の要素技術



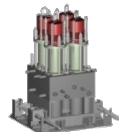
転動造粒、
ダイ潤滑
成型

遠隔製造・保守技術



○高速炉再処理技術

経済性・核拡散抵抗性に優れたプロセス技術



U, Pu, Np一括回収
高効率抽出

MA分離回収技術



抽出クロマトグラフィ
及び溶媒抽出法

AI支援型革新炉ライフサイクル最適化手法

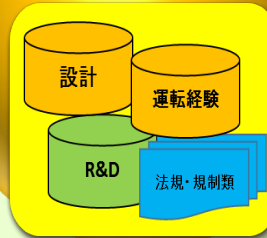
ARKADIA

～ **Advanced Reactor Knowledge- and AI-aided Design Integration Approach** through the whole plant lifecycle ～

- 競争力のある3E+S適合プラント像の提示
- 開発期間短縮・コスト削減
- 技術散逸防止・伝承・発展、人材育成

ナレッジベースシステム

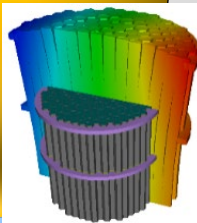
- 知見・経験等の集約と活用



解析システム

- 精緻／簡易、連成解析
- ヴァーチャルプラント機能

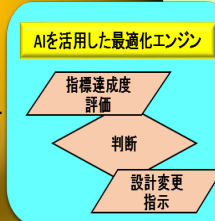
- 1) プラント動特性
- 2) CFD
- 3) 構造応答
- 4) 核特性 etc.



評価システム

- 複数指標に対する設計最適化支援

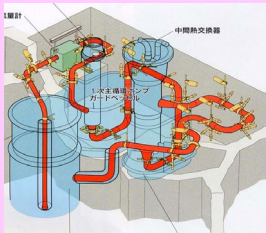
- 1) 安全性評価
- 2) 構造健全性評価
- 3) 保守・保全性評価
- 4) 経済性評価 etc.



3つのシステムをつなげるAI支援プラットフォーム

INPUT

● プラント設計例

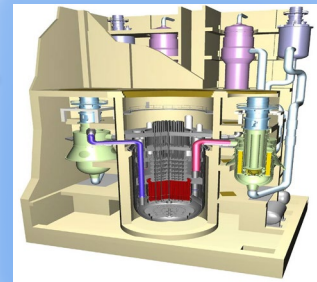


● 評価指標

- 開発目標
- 設計要求

OUTPUT

- 最適化オプションの提示



- 評価指標充足性

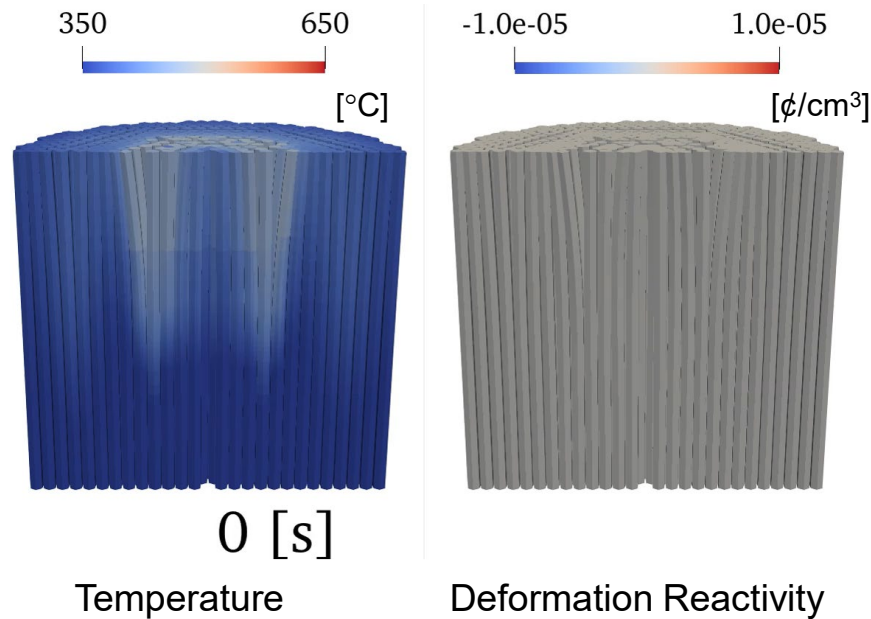
- 安全性
- 信頼性
- 経済性
- ...

ARKADIA： 新型炉の設計を支援するDigitalツール

ARKADIA-Design

炉心設計、プラント構造設計、保全などを適正化

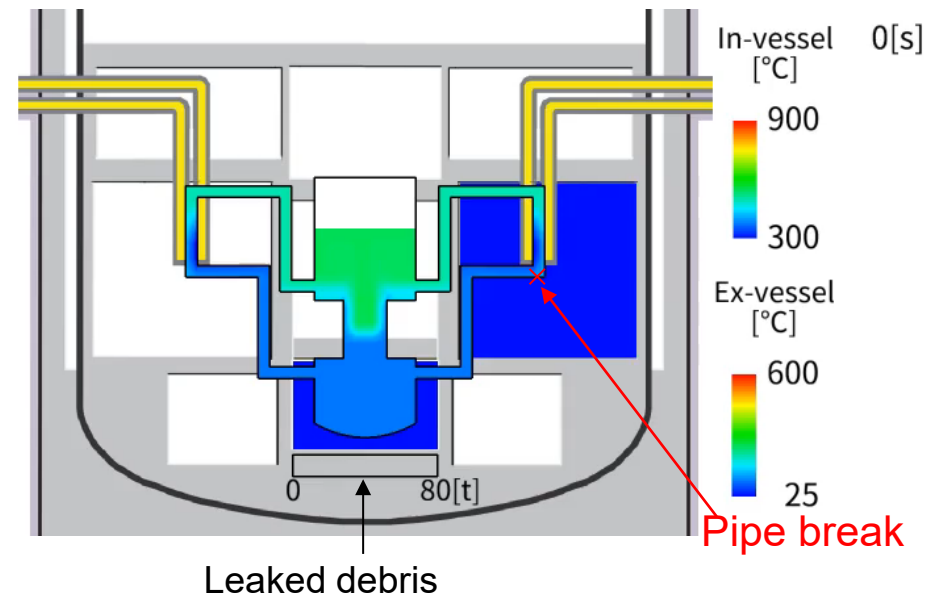
炉物理(核反応)、熱流動(流れ)、構造物(変形)
の相互作用を含む動的な解析評価の例



ARKADIA-Safety

シビアアクシデントを想定した安全評価

厳しい事故条件で複雑な物理現象(沸騰、溶融、
化学反応、物質移行)を模擬した解析の例



設計および安全評価のための解析システム部

高速炉の安全性に関するナトリウム試験

炉心溶融事故における原子炉容器内事故終息にむけて

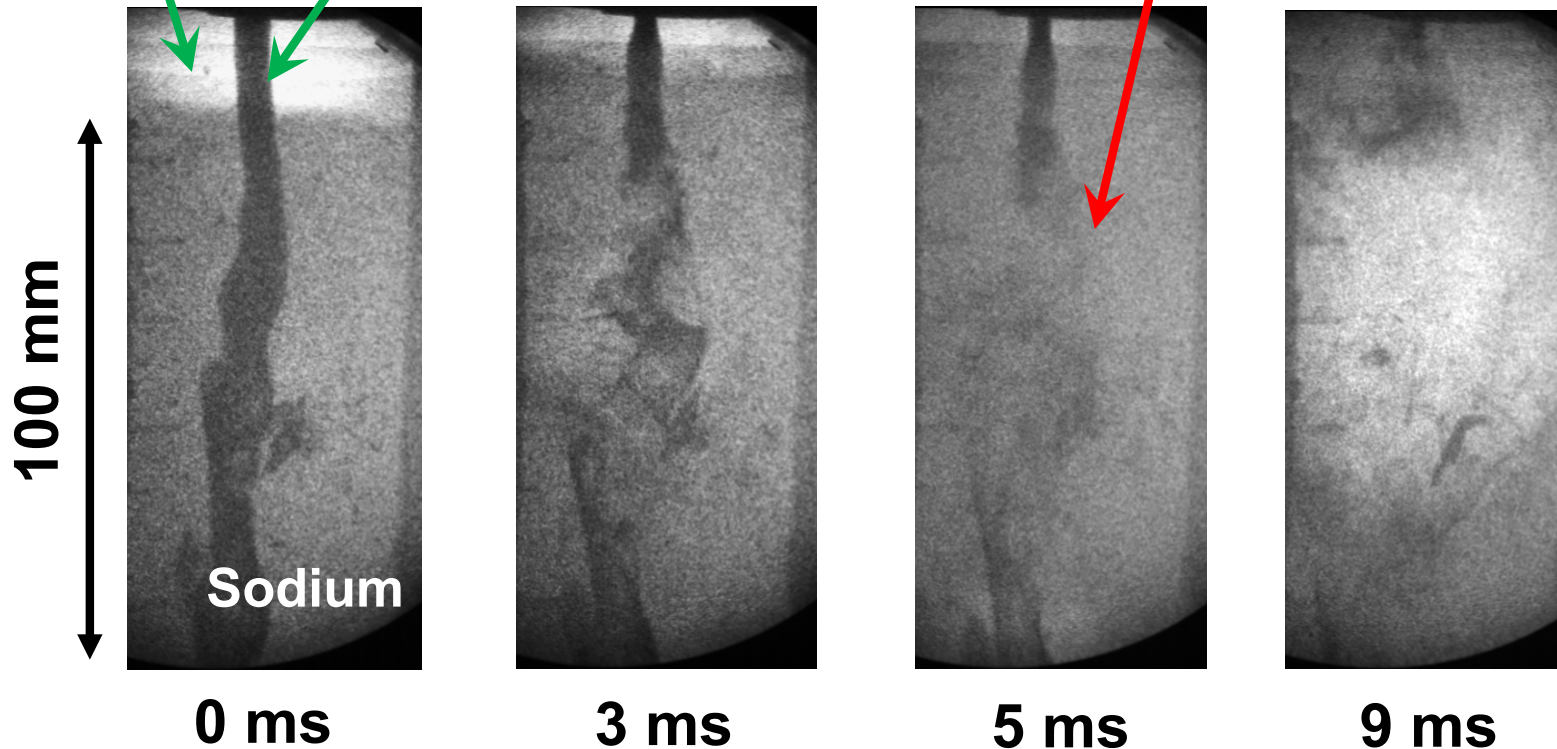
- MELT試験施設

シビアアクシデント時の炉心溶融物質のナトリウム中での挙動を模擬、観察

Cover gas

Molten steel

Fragmentation and quench



X線を用いたナトリウム中での高温融体の可視化

高速炉の安全性に関するナトリウム試験

炉心溶融事故における原子炉容器内事故終息にむけて

- MELT試験施設

シビアアクシデント時の炉心溶融物質のナトリウム中での挙動を模

Cover gas

Molten steel

Fragmentation

100 mm

Sodium

0 ms

3 ms

5 ms

X線を用いたナトリウム中での高温融体の可視化

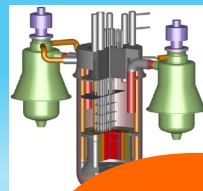
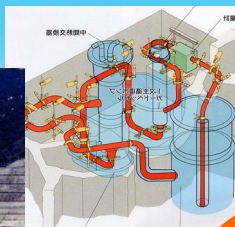


高速炉に適用する規格・基準体系の整備

プラント開発

設計のニーズ

維持のニーズ



リスク情報の活用

革新的構造の実現

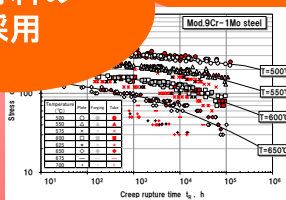
60年設計の実現

新材料の採用

目視困難箇所への対応

連続漏洩監視の導入

高速炉R&D



規格基準

1984

もんじゅ基準

規制体系

仕様規定も法律で定める

性能規定は法律で定め、仕様規定は民間規格を活用する

2005

JSME * 高速炉設計・建設規格初版

2006

2012

高速炉設計・建設規格2012年版

2017

・高速炉溶接規格初版
・高速炉機器の信頼性評価ガイドライン初版

2021

・高速炉設計・建設規格2022年版
・高速炉維持規格初版
・高速炉機器LBB評価ガイドライン初版

202x

リスク情報を構造設計に活用するガイドライン(炉型共通)

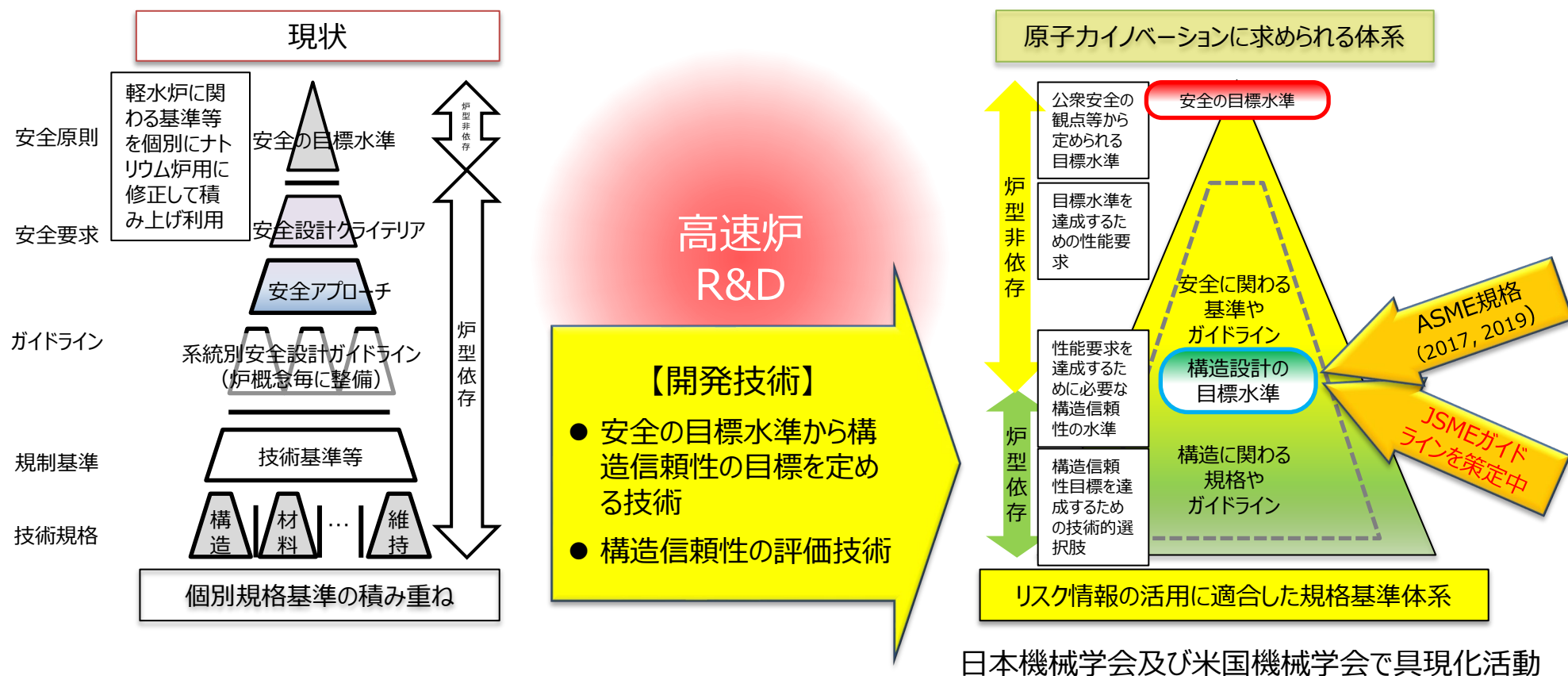
...

* 日本機械学会 発電用設備規格 設計・建設規格第II編高速炉規格、高速炉溶接規格、高速炉維持規格、高速炉機器の信頼性評価ガイドライン、ナトリウム冷却型高速炉破断前漏えい評価ガイドライン

規格基準における「リスク情報」の活用

リスク情報の活用

- ・リスク情報の活用は原子力規制・開発に係る国際的な動向
- ・リスク情報を安全設計に加え構造設計に活用するための体系構築が必要
- ・世界に先駆けASMEと協働、成果に基づきJSME規格を整備



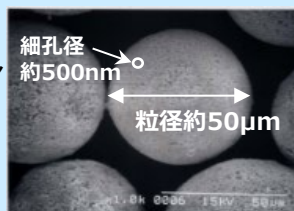
放射性廃棄物の減容化・有害度低減の研究開発

- 東海の核燃料サイクル工学研究所、高レベル放射性物質研究施設(CPF)にて「常陽」使用済燃料のプロセス廃液で、99.9%以上のMA*吸着性能を確認
- 照射試験用MA含有MOXペレット製造に向けて、約2gのMA回収を達成
- 大洗照射燃料試験施設(AGF)にて、遠隔燃料製造設備によりMA含有MOXペレットを試作し、照射試験用燃料製造の見通しを得た。

(*MA:マイナーアクチニド)

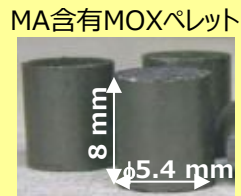
使用済み燃料の廃液からMAを分離

- 抽出クロマトグラフィ法により、ビーカースケールで高レベル放射性廃液中の99.9%以上のMA吸着に成功
- 使用済燃料から約2gのMA回収 (今後脱硝予定)



MA含有MOXペレット及び燃料ピン製造

- MA含有MOXペレットを試作
- 上記で回収したMA原料を用いて照射試験用MA含有MOXペレット、燃料ピンを製造へ (予定)



MA含有MOX燃料ピン製造



大洗:AGF

分離・回収



東海: CPF

軽水炉
高速炉

既存施設を用いて、
分離・回収、燃料製造、
照射、照射後試験までの
一連の試験に着手

照射



大洗:「常陽」

照射後試験



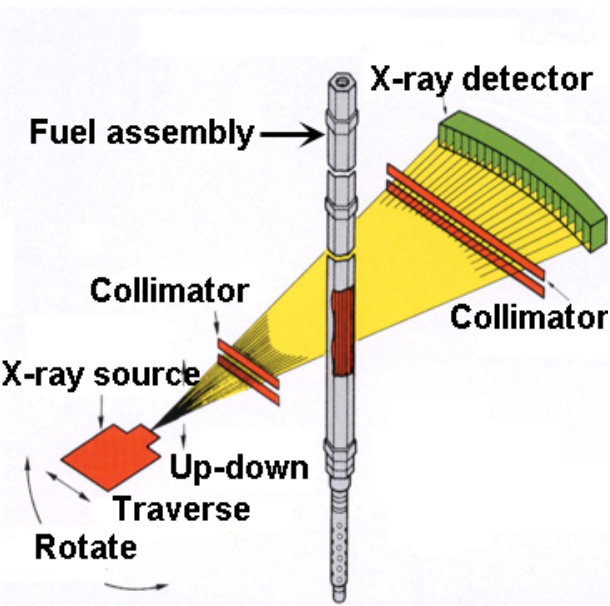
大洗: FMF

MAの分離から燃焼までサイクルの実証へ

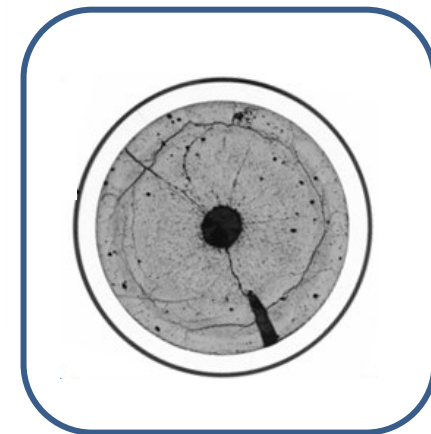
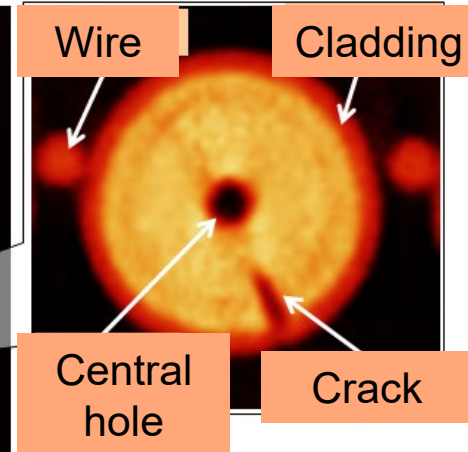
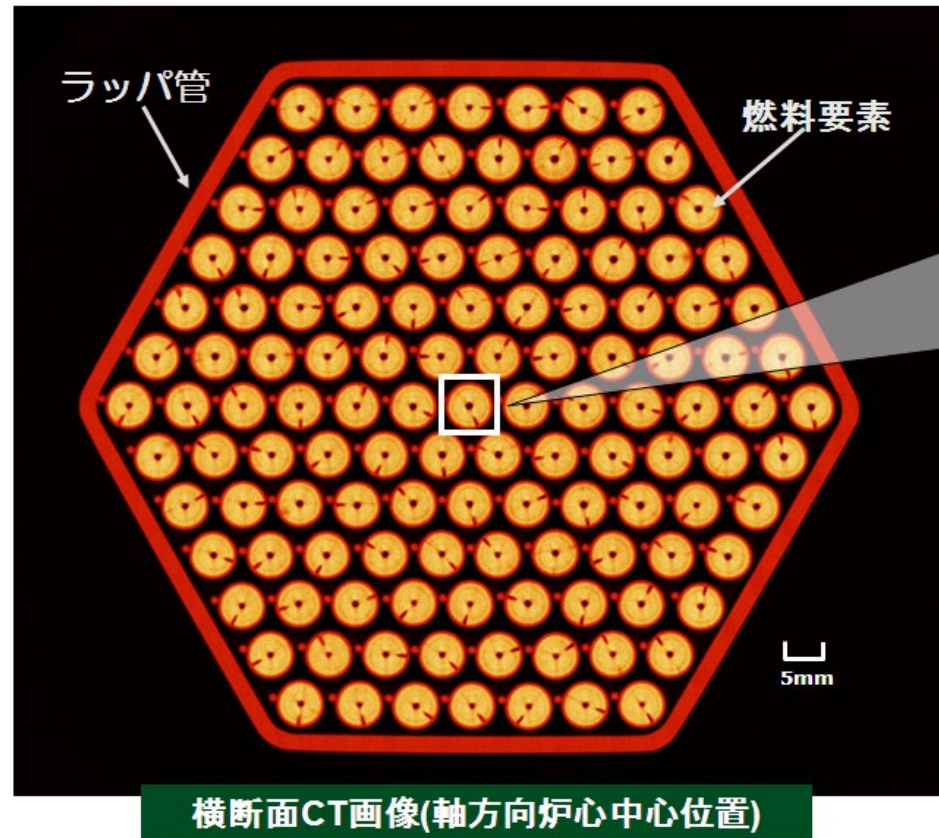
高速実験炉「常陽」と照射試験研究



常陽



X線CT装置配置図



燃料ピンの金相試験写真

X線CTによる燃料集合体の横断画像の例

高速炉開発を通じた非エネルギー分野への貢献

- 原子炉はエネルギー利用のみならず、医療分野で利用される放射性同位体（RI）の製造に活用することが可能
- 高速実験炉「常陽」では、高速炉開発のみならず、RI製造への貢献も期待される

「常陽」でのRI製造のメリット

医療用RIは全量海外に依存

①大量生産：中性子の密度が高く、加速器に比べて大量のRI製造が安価に製造可能

	製造量(μg)	コスト(円/μg)
原子炉(JRR-3) ※年間当たり	3,900	1,000
加速器 ※1照射当たり	42	33,000

原子炉と加速器でのモリブデン（**Mo-99**）の製造量・コスト面比較



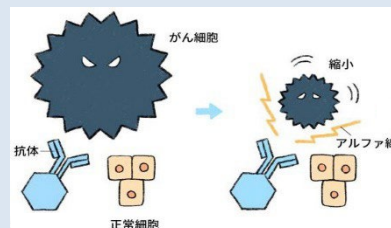
*1

質の高い医療に不可欠

モリブデン(**Mo-99**)：核医学検査でがん転移の発見等に利用

②希少なRI：高速中性子を活用して、希少なRI製造が可能

例：がん治療に使えるアクチニウム(**Ac-225**)の製造が可能
※減速材を併用することで、軽水炉と同様なRIも製造可能



アクチニウム(**Ac-225** 等)
アルファ内用療法による
ガン治療等に利用

*2

医療用RI国産化への期待（JAEA試験研究炉の活用）

- カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略に「常陽」への期待記載(2021.6)
- 高速実験炉「常陽」の「使用の目的」にラジオアイソトープ生産に関する研究開発等を追加。原子力規制委員会より原子炉設置変更許可を取得(2024.10)



*1 出典：国立健康危機管理研究機構 国立国際医療センター, https://www.hosp.jihs.go.jp/s037/008/010/scinti_01.html

*2 出典：2023—日本が抱えているエネルギー問題（後編），資源エネルギー庁, https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energyissue2023_3.html

Generation-IV International Forum (GIF)

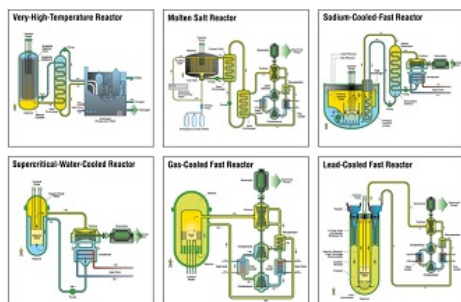
－ GIF Webinar と日本語ガイド



第4世代原子力システム

GIFは、安定的にクリーンなエネルギー供給を維持していくために、次世代原子力エネルギーシステムの開発に向けた国際的な協力活動を、過去10年以上にわたり実施してきました。第4世代原子炉は、燃料を効率的に使い、生成廃棄物を減らし、経済競争力が強く、安全性及び核拡散抵抗性の厳しい基準を満たすことができます。

GIF開始時（2002年）に、これらの目標を達成するシステムを選定しました。100名あまりの専門家が130の原子炉概念を評価し、6種類の概念に分類し、開発を推進していくことにしました。これが、GIFが研究開発を進めている6つの原子炉概念です（[ガス冷却高速炉](#)（GFR）、[鉛冷却高速炉](#)（LFR）、[熔融塩炉](#)（MSR）、[超臨界水冷却炉](#)（SCWR）、[ナトリウム冷却高速炉](#)（SFR）、[超高温原子炉](#)（VHTR））。



このうちいくつかの原子炉は、今後10年以内の実証、2030年代には商用展開の可能性あります。

GIF ウェビナーガイド

The Generation IV International Forumは、技術ウェビナー講座をおおよそ月1度の頻度で開催しております。内容は、GIFにおいて、国際協力の形で開発を進めております次世代原子力システム、安全・経済性・燃料や流動といった各分野の技術紹介、フェニックス、ロシアのBNシリーズ等の 既存炉の経験、HTR・MYRRHA・ALFRED・ASTRID等現在進行中のプロジェクトの紹介と多岐にわたっております。これまでのウェビナー内容は、Youtubeにて英語字幕とともに下記から閲覧可能です。なお、今後のウェビナー情報は、[GIFホームページ（NEA英語版）](#) から、閲覧可能です。

1. Introduction to seizing opportunity (イントロダクション、新規機会)
2. Safety, Quality, Economics and Regulation (安全、品質、経済性及び規制)
3. Fuel Cycle, Sustainability, PRPP and Disposal (燃料サイクル、持続可能性、PRPP及び処分)
4. Generation IV System Design and Related Technology
(第4世代原子炉のシステム設計及び関連技術)
- 4-1. Fast Reactors System Designs and related projects
(高速炉の設計・建設経験と推進プロジェクト)
- 4-2. Advanced Reactors System Designs with specific motivations and related projects
(多様な開発目的を持つ先進炉の設計・建設経験と推進プロジェクト)
5. Life cycle designs, Operational experiences, Inspections, Coolant quality control, Test loops
(ライフサイクルデザイン、運転経験、検査、冷却材純度管理、試験ループ)
6. Fuel, Core Design (燃料、炉心設計)
7. Thermal hydraulics, Structure, Material designs (熱流動設計、構造/材料設計)
8. Winning Webinars by young generations
9. Others (その他)

Webinar-GuideBook

GIFのウェビナーシリーズ

次世代原子炉システムに関して、GIFが有する知識の共有、若い技術者の参加を呼びかけるため、GIFではほぼ毎月公開技術ウェビナーを開催しています。

ウェビナーの内容は、GIFで開発中の次世代原子炉システムのプラント概念、各技術分野（安全性、経済性、燃料特性、流動特性等）の紹介、既存炉（フェニックス、ロシアのBNシリーズ等）の経験、現在進行中のプロジェクト（HTR・MYRRH・ALFRED・ASTRID等）の紹介が多岐にわたります。

Mission Statement

GIF教育訓練タスクフォース（GIF-ETTF）は、GIFを支援する人や組織のコミュニケーション及びネットワークに、より良いオープンな教育と知識を提供する国際的なグループです。

Integration of GIF knowledge

- 第4世代原子炉システムの知識を集約しGIF関係者に提供すると共に、より多くのステークホルダーに知識を提供する方法を検討
- 教育訓練活動の情報やアイデアを交換するためにソーシャルメディアを活用
- 第4世代原子炉システムやシステムを構築するために必要な技術に関するウェビナーを開催

https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_82831/webinars

Webinar list

- イントロダクション
 - 1-1. Atoms for Peace：次世代原子炉システムの開発の歴史
 - 1-2. 原子炉システム設計
- 安全性と規制
 - 2-1. 第4世代原子炉システムの安全性
 - 2-2. ナトリウム冷却高速炉の安全設計クライテリア（SDC）と安全設計ガイドライン（SDGs）
 - 2-3. 変動的崩壊熱除去システム
- 持続可能性と燃料サイクル
 - 3-1. クローズド燃料サイクル
 - 3-2. 燃料サイクルの実現に向けた持続可能性に関する検討
 - 3-3. 燃料サイクルにかかわる科学技術的諸問題
 - 3-4. Th-U依存型/非依存型/溶融塩炉アクチノイド再生機及び変換システム：MOSART
- 第4世代原子炉のシステム設計及び関連技術
 - 4-1. 高速炉の設計・建設経験とフィードバック
 - 4-1-1. ナトリウム冷却高速炉（SFR）
 - 4-1-2. 欧州型ナトリウム冷却高速炉の紹介：ESFR
 - 4-1-3. 鉛冷却高速炉（LFR）
 - 4-1-4. 欧州先進型鉛冷却高速炉実証炉：ALFREDプロジェクト
 - 4-1-5. LFR技術に基づく加速器駆動型システム：MYRRH
 - 4-1-6. ガス冷却高速炉（GFR）
 - 4-1-7. ガス冷却高速炉試験炉プロジェクト：ALLEGRO

2. 安全性と規制

2-1. 第4世代原子炉システムの安全性

概要 / 目的:

第4世代原子炉技術ロードマップで特定されている目標には、高い安全性と信頼性があります。今回はその目標達成に向けた6種類の第4世代原子炉に関するGIFリスク安全性ワーキンググループ（RSWG）の活動、ならびに、第4世代原子炉システムの安全原則、先進炉に対する現在の安全性の枠組み、安全評価のために開発された安全性評価手法、さらには、安全設計評価者と、第4世代原子炉システムのプラント設計者に共同で進めている各プラントの評価作業について紹介します。

講演者紹介:

Dr. Luca Ammirabile は、欧州委員会（EC）に所属し、共同研究センター（ベッテン、オランダ）において原子炉安全・緊急時対策ユニットの原子炉事故モデリング（NURAM）チームのグループリーダーを務める。彼のグループは、シビアアクシデントの予防・緩和とソースターム決定に関連した安全性課題に焦点を当て、現行炉と革新的原子炉の安全性評価を担当する。現在は、炉心熱流動解析、決定論的コードの適用と開発、先進的原子炉の安全評価を対象とした研究活動を実施している。

2014年以降、第4世代原子炉システムに関する国際フォーラムのリスク安全性ワーキンググループの共同議長を務める。また、OECD/NEAが組織する事故分析管理作業部会（WGAMA）と先進炉の安全性に関する作業部会（WGSAR）の欧州委員会代表も務める。2007年の欧州委員会所屬前、Tractebel Engineering（現 Tractebel Engie、ベルギー）の熱水力・過酷事故部門に勤務し、ベルギーの原子力発電所の安全性評価を支援するための革新的な方法論の開発などのプロジェクトに従事した。2003年にインペリアル・カレッジ・ロンドンで博士号を、1999年にイタリアのピサ大学で原子力工学の修士号を取得。

トピックス:

リスク安全性ワーキンググループ:
GIFリスク安全性ワーキンググループ（RSWG）の主要な目的は、「安全性、リスク、規制」についての、第四世代システム間で貫いたアプローチの推進である。
この目的のためRSWGは、技術的中立な統合安全評価方法論（ISAM）の開発及び推進を行っている。

System	Neutron Spectrum	Coolant	Pressure (MPa)	Temperature (°C)	Fuel Cycle	Size (MW)
GFR	Fast	Helium	~5	400	Closed	1200
LFR	Fast	Lead	10-15 (Lead)	400-600	Closed	45-1500
MSR	Fast or Thermal	Fluoride salt mixture	10-15 (Lead)	500-600	Closed	1000-1500
SFR	Fast	Sodium	10-15 (Lead)	500	Closed	50-1500
SCWR	Thermal or Fast	Water	~25	550-625	Open through or Closed	300-800
VHTR	Thermal	Helium	~5-10	800-1000	Open through	750-300

安全・信頼性目標の解釈（深層防護）:
GIFの安全・信頼性目標は、深層防護の概念と対応付けられる。

- ・ 運用における安全性・信頼性に優れる
 - 深層防護 Level 1-2 [通常運転、異常過渡状態]
- ・ 炉心損傷の可能性と規模が十分に小さい
 - 深層防護 Level 2-3 [過酷事故防護設計]
- ・ オフサイト緊急時対応の必要性を排除できる
 - 深層防護 Level 4 [過酷事故緩和設計]

GIF Webinar

- 知識の共有、若手技術者の参加を重要視している。おおよそ月1度の頻度で開催。
- 内容は、第4世代炉に関する技術紹介、既存炉設計・運転により得た経験、進行中のプロジェクトの紹介と多岐にわたっている。（講座のYouTube移植により、英語字幕表示が可能になった）

<https://www.youtube.com/@gifetwg/videos>

GIFウェビナーガイドブック

- GIFの日本語版ウェブサイト(<https://gif.jaea.go.jp/>)を作成し、日本の視点を加えてGIFを紹介。
- 全40講座を技術分野に基づき再構成し、講座紹介だけでなく「革新炉開発の読み物」として。
 - ✓ <https://gif.jaea.go.jp/webinar/index.html> 日本語ウェビナーガイドブック
 - ✓ <https://gif.jaea.go.jp/index.html> 最新ウェビナー講座を含むWhat's New

□ GIFから国レベルへのアプローチ:

Clean Energy Ministerial (CEM)

➤ NICE Future Initiative (Nuclear Innovation: Clean Energy Future : 日米加の政府がリード)

❖ CEM10: Breakthroughs event-Panel (Vancouver, 2019)

❖ Report: Flexible Nuclear Energy for Clean Energy Systems (2020)

▪ 13. Generation IV International Forum: Delivering Next Generation Nuclear Systems

❖ Booklet: Pathways to net zero using nuclear innovation (2021) ➡

□ GIFよりCOP26に書簡を送付



GIF calls for nuclear's inclusion in COP26 discussions

Friday, 29 October 2021

All realistic options that might contribute to global net-zero must be considered, the Generation IV International Forum has said in an open letter to COP26 President Alok Sharma. Nuclear systems and advanced reactors - such as **Generation IV systems - can contribute to a net-zero society alongside renewable energies**, it says.



2.1 Generation-IV International Forum (GIF)

The six most promising nuclear energy systems identified by GIF are:

Sodium-cooled Fast Reactor (SFR)
Very High Temperature Reactor (VHTR)
Gas-cooled Fast Reactor (GFR)
Molten Salt Reactor (MSR)
Lead-cooled Fast Reactor (LFR)
Super Critical Water-cooled Reactor (SCWR)

The Generation-IV International Forum (GIF) is a multinational co-operative endeavor organized to foster the research and development needed to accelerate the deployment of the next generation of nuclear reactor systems. Since its foundation in 2000, GIF has identified [six nuclear energy systems](#) being the most promising to meet its objectives, assuming a deployment horizon beyond 2030.

As well as the GIF Goals of [sustainability, safety, Proliferation, Risk, and Physical Protection \(PRPP\)](#) and [economics](#), the flexibility characteristics are becoming increasingly recognised as essential attributes for future energy sources. In the NICE Future initiative's "[Flexible Nuclear Energy for Clean Energy Systems](#)" report, GIF set out the flexibility characteristics of Gen IV reactors in Chapter 13.

Sustainability is a key issue of Generation-IV reactor systems, as these technologies enable stable and long term utilization of nuclear across a broader clean energy system. These new designs aim to efficiently use uranium resources and further minimize waste and environmental load. The minimization of environmental load means not only being CO₂-free but also reducing the amount of high level radioactive waste by means of burning of long term radioactive nuclides of Minor Actinides in the spent fuel.

One particular benefit of the Generation-IV reactor systems is higher outlet temperatures ranging 700 to 950°C (i.e., VHTR, GFR, LFR, and MSR), and ~550°C (SFR). This high temperature brings flexibility of energy use. This includes non-electrical applications of their nuclear heat, such as hydrogen production, industrial process heat to chemical processing facilities, and efficient heat storage.

Hideki Kamide
Chair of GIF



日本の原子力発電所稼働状況

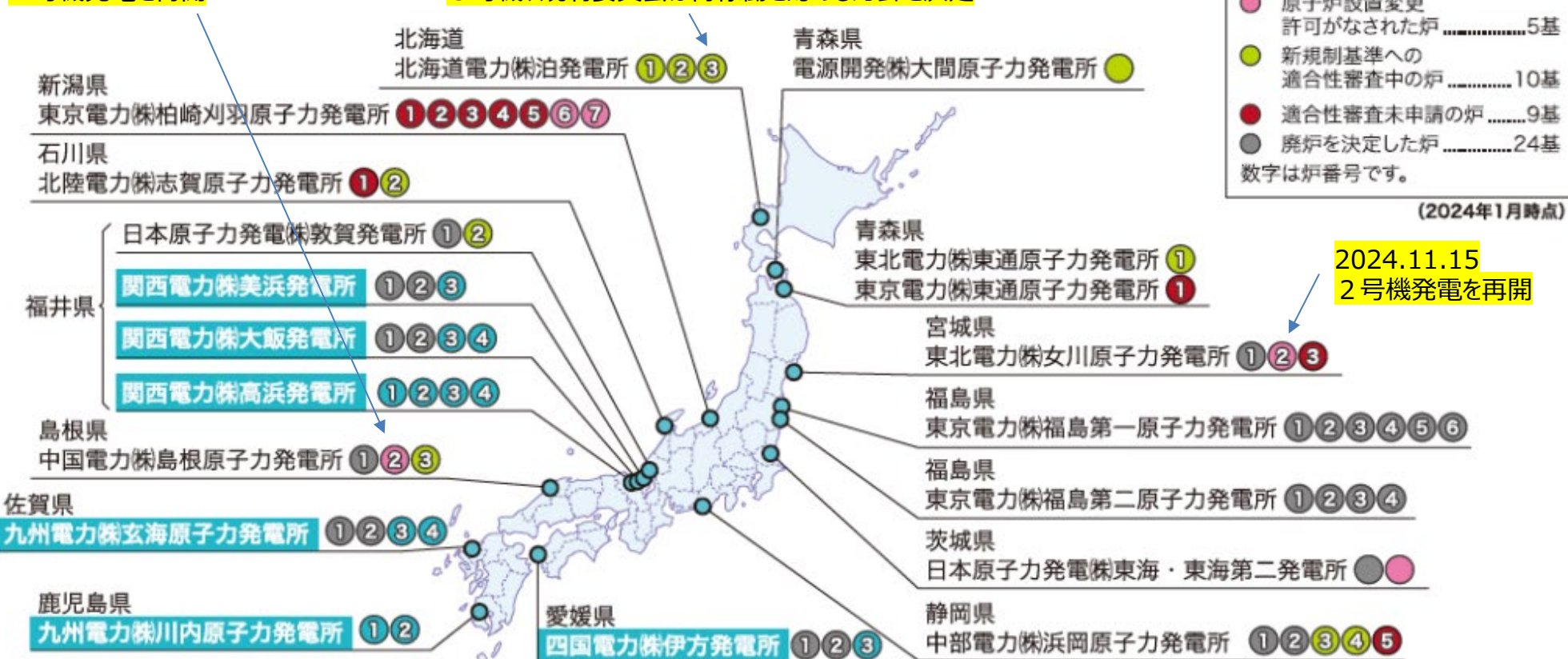
- 電力の安定供給やコストの引き下げ、温室効果ガス(GHG)の排出抑制に、原子力発電は欠かせない電源。
- 2024年1月現在、日本全国で12基の原子炉が稼働。
- 原子力規制委員会が新規規制基準に適合すると認めた場合のみ、地元の理解を得ながら、**原子力発電所の再稼働**を進め、**エネルギーの安定供給**と**カーボンニュートラルの実現**の両立を目指す。

2025.1.10

2号機発電を再開

2025.4.30

3号機、規制委員会は再稼働を認める方針を決定

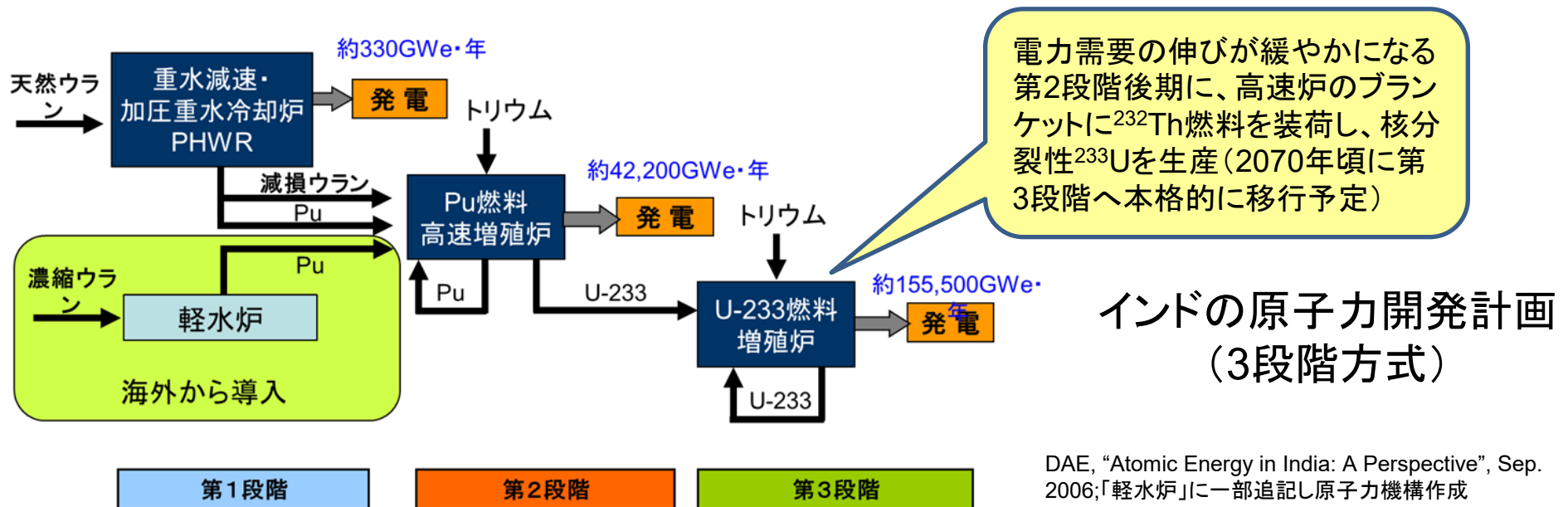


◆ 原子力発電の現状：

- 運転中23基・7.4GWe (BWR2基、PHWR19基、VVER2基)
全発電設備容量(392GWe)に占める原子力比率2%(2021年)、全発電量に占める原子力比率3.1%(2022年)
- 建設中7基・5.4GWe (PHWR2基、VVER4基、PFBR1基)

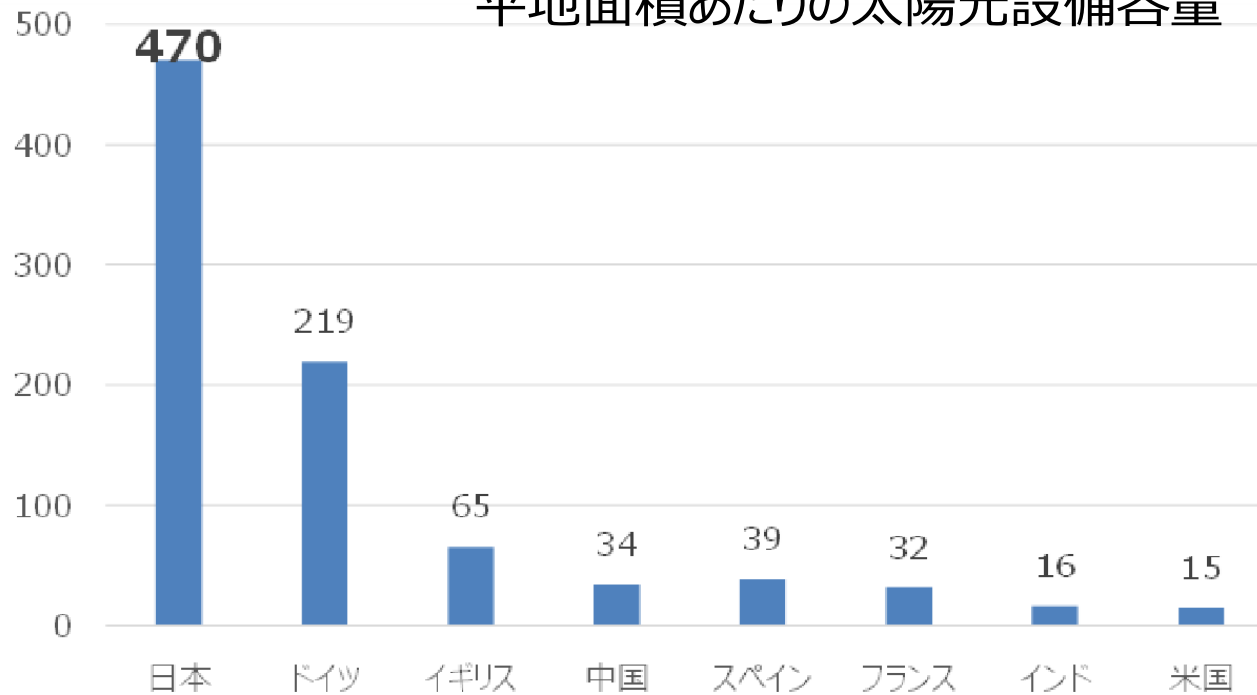
◆ 2023年4月、政府は2031年までに原子力発電容量を6.8GWeから22.5GMWeに増加させる計画を発表、2047年までにインドの電力の9%近くを原子力発電が占める。

◆ 国内に豊富なトリウム(Th)資源（世界第2位の埋蔵量）を将来有効活用する「**ウラン-トリウムサイクル**」をベースとしたインド独自の**3段階の原子力開発計画（閉じた核燃料サイクル）**を1950年代前半に策定し、この計画に沿って原子力開発を進めている。現在は、その第2段階に当たる**高速炉サイクル技術開発**を重点的に進めている。なお、当初の計画にはなかったが、国内の急増する電力需要に対応するため、**海外から大型軽水炉の導入**も進めている。



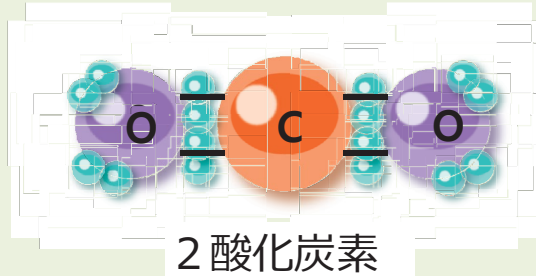
(kW/km²)

平地面積あたりの太陽光設備容量



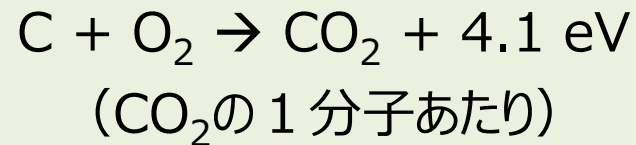
出典：再生可能エネルギー発電設備の適正な導入及び管理のあり方に関する検討会について（2022年4月26日），資源エネルギー庁，
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/041_s01_00.pdf

化学反応と電子の共有結合



化学反応と電子の共有結合

北海道大学オープンコースウェア
第11章 化学と化学結合, p.190より

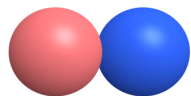


出典：鈴木久男, ゼロからはじめる「科学力」養成講座1(2011), 第11章 化学と化学結合,
<https://ocw.hokudai.ac.jp/lecture/scienceliteracy1-2011>

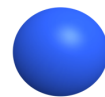
誰でも分かる核融合のしくみ | 核融合とは？

核融合のしくみ

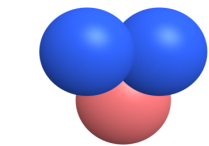
重水素(デューテリウム)



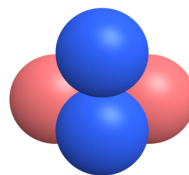
中性子



核融合



三重水素(トリチウム)



ヘリウム

水素の仲間（同位体）である**重水素**（D）と**三重水素**（T）の原子核が融合するDT核融合反応では、ヘリウムと中性子ができます

参考：QST 誰でも分かる核融合のしくみ | 核融合とは？

<https://www.qst.go.jp/site/jt60/4930.html>