

核燃料サイクル における再処理

(原子力を長期に利用するために)

2024年10月31日

日本原燃(株) 田中治邦

論 旨

- 世界の脱炭素の実現性には疑問あり、原子力は必須
- 原子力を長期に利用するにはワンスルーでは駄目で、核燃料の再処理・リサイクルが必要
- 現在の核燃料サイクルは軽水炉のプルサーマルだが、天然ウラン資源の節約効果は小さい
- 長期的には高速炉とその核燃料リサイクルが必要だが、その本格導入には大量のPuの準備が必要
- 乾式再処理によるMAの同時回収、燃料加工、炉内燃焼は、核不拡散性に優れ、最終処分負荷、核燃料サイクルコストの観点でも理想的

現代社会はエネルギーが必要

■ 自然界の生命は、生存のためにエネルギーが必要

- ◇ 動物は植物や自分より弱小な動物を食べて体内に**栄養分**として蓄え、これを**呼吸**(O_2 吸入、 CO_2 排気)により**酸化**させ活動のエネルギーを獲得(燃焼熱)
- ◇ 植物は、太陽光からエネルギーを得て生体を形成(**光合成**)
呼吸(酸化)よりも光合成(炭酸同化)の方が生体形成成分が多い
- ◇ 動物の屍骸や枯れた植物の腐敗は、土中のバクテリアが栄養摂取し呼吸
- ◇ 古来人類は枯木や枝を**燃やして暖**をとり、**食物を調理**して生存してきた

■ 現代社会は莫大なエネルギーが必要

- ◇ 家庭： 空調(暖房、冷房)、照明、調理(加熱)、給湯(浴槽ほか)、冷蔵庫、洗濯機、掃除機、TV/Audio
- ◇ 製造業： 機械加工、材料製造、照明、空調、給水、搬送、建設機械
- ◇ 運輸： 陸上(自動車、電車)、海上(船舶)、航空(飛行機)
- ◇ 店舗： 照明、空調、冷蔵、物品搬送、エレベータ・エスカレータ・自動ドア
- ◇ 事務所： 照明、電子機器、空調、エレベータ
- ◇ 農水業： 温室、散水、薬剤散布、耕作機械、収穫物輸送
- ◇ 水道： 上水の供給(地方自治体の行政事業) 等々

➡ エネルギーは**人間社会の成立に欠かせない**

2

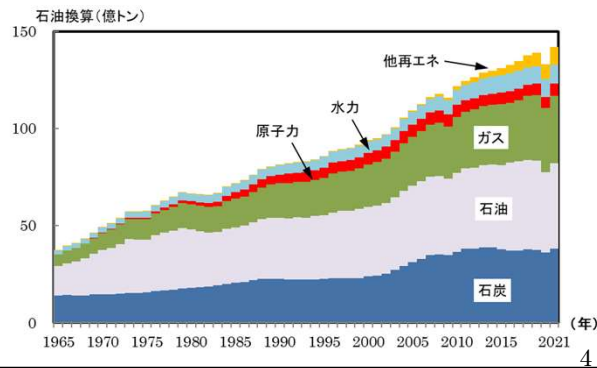
各エネルギー資源の長所・短所

	石油	天然ガス	石炭	原子力	水力	太陽光	風力	地熱	バイオマス
国内自給	×	×	×	○	○	○	○	○	○
コスト	×	○	○	○	○	△	△	×	×
CO_2 排出	×	×	×	○	○	○	○	○	○
規模・密度	○	○	○	○	○	×	×	×	×
持続性	×	×	×	○	○	○	○	○	○
備蓄性	×	×	×	○	○	×	×	○	×
負荷追従性	○	○	△	△	○	×	×	○	○
安定性	○	○	○	○	○	×	×	○	○
安全性	○	○	○	△	○	○	○	○	○
廃棄物	○	○	○	×	○	○	○	○	○
輸送用	○	○	○	×	×	×	×	×	×
発電用	○	○	○	○	○	○	○	○	○

3

世界の一次エネ供給(エネルギー資源別)

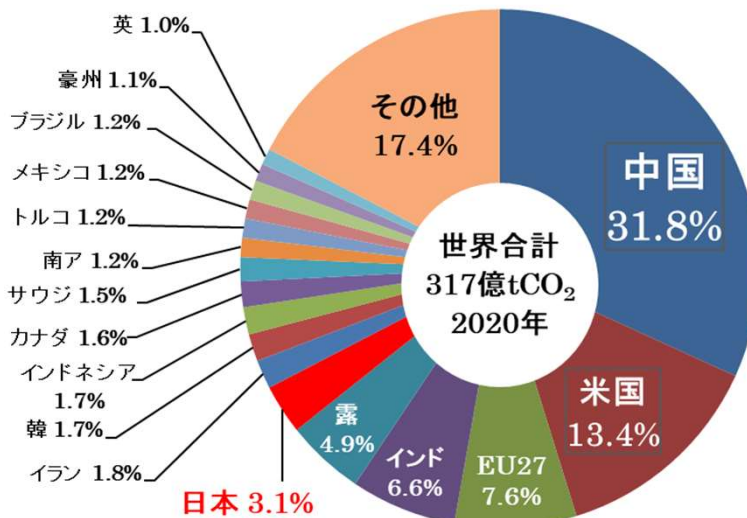
- 一次エネルギー供給量(世界合計)を比較; 1965 → 2021年
- 石油; 年平均 **1.9%**で増加、今でも最大シェア 31.0%
 - ◇ 発電用では他へ転換が進んだが、輸送用燃料消費が堅調で増加
- 石炭; 年平均 **1.8%**で増加、シェア 26.9%
 - ◇ 2000年代、中国などアジア地域を中心に消費量が拡大
 - ◇ 近年は中国の需要鈍化、米国の天然ガス代替による需要減少で伸び悩み
- 天然ガス; シェア 24.4%
 - ◇ 年平均 **3.2%**で増加
- 原子力; シェア 4.3%
 - ◇ 年平均 **8.6%**で増加
- 水力; シェア 6.8%
 - ◇ 年平均 **2.8%**で増加
- 他再エネ; シェア 6.7%
 - ◇ 年平均 **12.8%**で増加



4

エネルギー起源CO₂ 国別排出割合

- 中国が米国の2.3倍以上、全世界の3割以上に達している(2020年)



5

各国の脱炭素の達成時期(COP26)

- 産業革命前からの気温上昇を1.5℃以内に抑えるためには、2050年までにCO₂排出量を実質ゼロ(カーボンニュートラル)とする必要があるとされるが、各国が表明する自国での達成時期は;

- ◇ 先進国(EU、英国、米国、カナダ、日本); **2050年**

- ◇ 中国・ロシア・サウジアラビア・ブラジル; **2060年**

- ◇ インド; **2070年**

- カーボンニュートラルを実現するには;

- ◇ 大幅な省エネ

- ◇ 確信を持ってないほどの技術革新

- ◇ エネルギー価格の高騰

が必要で、絵には描けてもその実現を保証できる国はあるまい

- **10年ごとの達成時期のズレが意味することは何か、注意が必要**

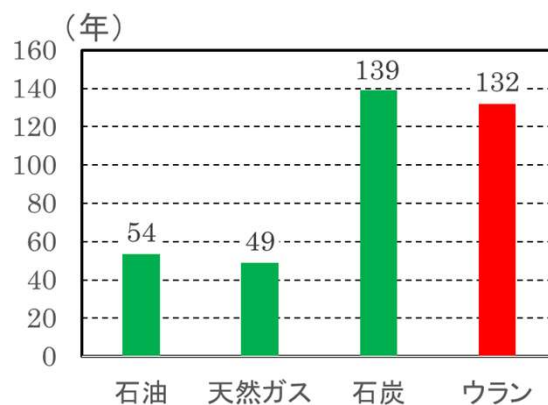
6

エネルギー資源の可採年数

- 可採年数(年) = 確認可採埋蔵量(トン) ÷ 年間生産量(トン/年)

- **ウランも有限で、化石燃料と比べ大した優位性はないように見える**

- ◇ その理由は、天然ウランに0.7%しか含まれない²³⁵Uを軽水炉のワンスルーで燃料として使う計算であるため



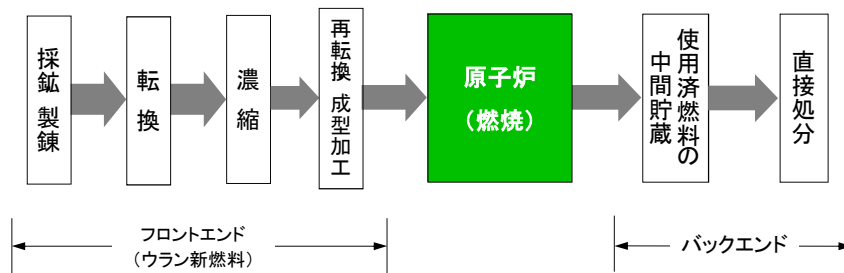
7

軽水炉のワンスルー

- **使用済燃料を再処理せず、廃棄物と見做して、そのまま地下深くに埋設処分する方針**の原子力利用国がある

- ◇ 国内の**原子力規模が小さく**、再処理工場の建設には採算性が無い国
- ◇ それらの国も再処理工場を有する**英仏へ再処理を委託**した実績あり

- 使用済燃料の中は、殆どが有用物質（燃え残りのウラン、新たに生成したプルトニウム）であり、**廃棄物は高々5%程度**



8

軽水炉の天然U利用率

- 濃縮ウラン製品を得るのに必要な天然ウラン供給量の計算

- ◇ 六フッ化ウラン UF_6 全体量の収支

$$F = P + W \quad (\text{単位はトン、トン/年、または kg、kg/年 など})$$

- ◇ $^{235}\text{UF}_6$ の収支

$$x_f \times F = x_p \times P + x_w \times W$$

- ◇ この連立方程式を解けば需要Pを作り出す必要な天然ウラン量が求まる

$$x_f \times F = x_p \times P + x_w \times (F - P) \rightarrow (x_f - x_w) \times F = (x_p - x_w) \times P$$

$$F/P = (x_p - x_w) / (x_f - x_w)$$

- ◇ 例えば、新燃料製品濃縮度4.5%、天然ウラン0.711%、廃品濃縮度0.25%とすると、 $(4.5 - 0.25) / (0.711 - 0.25) = 9.22$

- **低濃縮ウラン燃料**を作るために、**10倍近い天然ウラン**が必要

- ◇ 濃縮工程以外にも、転換工程で0.5%、成形加工で2.5%程度のロスあり

- 軽水炉の取出燃焼度を45,000MWd/tとすると**燃焼率は4.5%**

- ◇ **1gの核分裂で1MWd**のエネルギー発生（200MeV/fissionより）

- ◇ $1 \div 9.22 \times 0.97 \times 0.045 = 0.0047 \rightarrow$ **天然Uの利用率は0.5%程度**

9

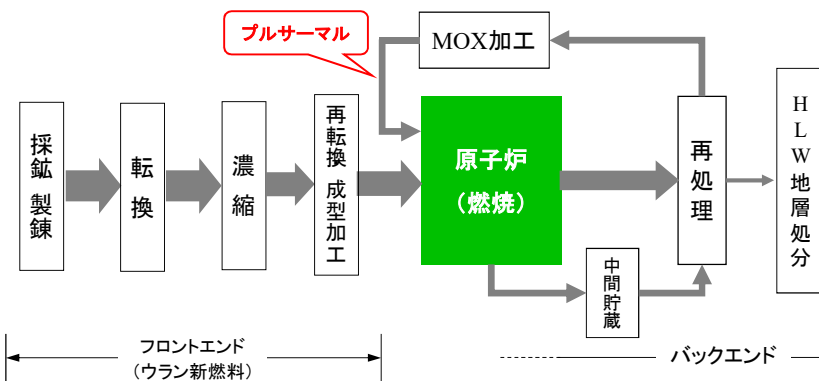
核燃料はリサイクル利用が可能

- 石油・石炭・天然ガス等の化石燃料は燃えれば消えて無くなる
 - ◇ 1回使えばそれで終わり; $C + O_2 \rightarrow CO_2$ $H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$
- 原子力エネルギーは燃料のリサイクル利用が可能
 - ◇ 原子炉は²³⁵Uの核分裂連鎖反応をちょうど臨界に維持し一定出力を発生
 - ◇ 原子炉の中でエネルギーを発生し終えて炉心から取出される使用済燃料は、新燃料と比べて姿・形は変わらない
 - ◇ 使用済燃料になるまでに核分裂したウランの数はごく一部に過ぎず、廃棄物として捨てるべき灰(FP; 核分裂生成物)は4.5%程度に過ぎない
 - ◇ ウラン燃料の組成は大半が²³⁸Uなので、燃料の中では²³⁵Uの核分裂が進行しつつ、²³⁸Uが中性子を吸収してPuに変換し、使用済燃料の中に蓄積
 - ²³⁹Pu、²⁴¹Puは核分裂しやすいので、蓄積したPuの一部は炉心の臨界維持に寄与し、発生する熱エネルギーのうち2/3がウラン、1/3がPuによる
 - ◇ そこで、使用済燃料はそのまま捨てずに再処理し、U・PuとFP・MAとを分離し、回収したU・Puを燃料として再利用すれば、燃料の節約と廃棄物の削減に役立つ

10

軽水炉の燃料リサイクル

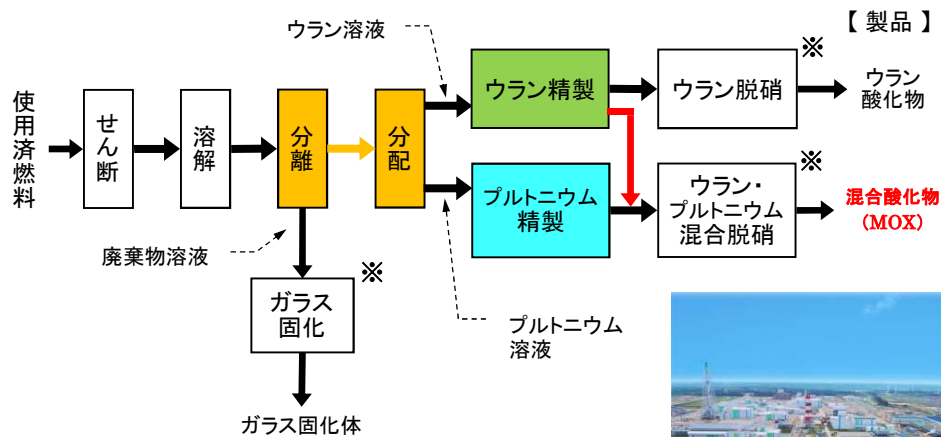
- 使用済燃料を再処理して、有用物質を回収
 - ◇ 回収プルトニウムは、MOX燃料に加工し軽水炉へ供給; プルサーマル
 - ◇ 回収ウランは、再濃縮してウラン燃料に加工し、軽水炉へ供給
- これらにより、ウラン新燃料の供給を1～2割節約



11

使用済燃料の再処理プロセス

機器の高性能化により、「抽出・洗浄・逆抽出」のサイクルを3回だけで完成



※①ウラン脱硝、②ウラン・プルトニウム混合脱硝、③ガラス固化は国内技術を採用

14

六ヶ所再処理工場の化学処理工程

■ 前処理

- ◇ 使用済燃料を剪断して濃硝酸に浸けると燃料ペレットは溶解し、ジルカロイ製被覆管は溶けずに残るため分離できる(前処理)

■ 溶媒抽出

- ◇ 硝酸水溶液と有機溶媒の2相の間で、溶質を移動させる
 - 2相の接触混合、相分離(密度差を利用)により、溶質を移行する
 - 有機溶媒: ドデカン($C_{12}H_{26}$)で希釈したTBP(トリブチルリン酸($C_4H_9)_3PO_4$))
- ◇ U・Puと、FP・MAとの分離
 - 硝酸溶液中のUは6価、Puは4価で、有機溶媒と接触させるとFPは水相に残り、U(VI)とPu(IV)が有機相に移る(共除染によるFPとの分離)
- ◇ UとPuの分配
 - 抽出液に還元剤(4価のウラン化合物)を入れるとPuが3価に還元され、水を接触させるとPu(III)が水相に逆抽出され、U(VI)は有機相中に残る
- ◇ U、Puそれぞれの精製
 - それぞれ十分に酸化させて有機溶媒に抽出し、次に還元して水溶液中に逆抽出することで、純度を高め、U溶液、Pu溶液を得る

■ 脱硝

- U溶液はそのまま脱硝して UO_3 粉末、Pu溶液にはU溶液を混ぜてから混合脱硝してMOX粉末を得る

15

六ヶ所再処理工場のアクティブ試験実績

■ 最大再処理能力 800 tU/年

- ◇ 実績のある仏国の技術を中心に、日英独の技術も結集し、先行施設の経験を反映した最新鋭の再処理工場
- ◇ 核不拡散に配慮した**混合脱硝技術**、並びに**最新の保障措置技術**を適用
 - PUREX法ではあるが、純粋な分離プルトニウムを生産しない

■ 運転員は、予め仏ラアーグ再処理工場で訓練

- ◇ 仏ORANO社、日本原子力研究開発機構が六ヶ所工場に常駐して支援

■ アクティブ試験の実績

- ◇ 既に使用済燃料**約425トン**をせん断・溶解
 - BWR燃料約219トン、PWR燃料約206トン
- ◇ 回収した製品(2024年9月末現在)
 - ウラン製品粉末 約 366トンU
 - **MOX製品粉末** 約 6.66トンHM
(核分裂性Pu 2.17トン、**全Pu 3.33トン**)
 - 高レベル廃液のガラス固化体 346 本
- ◇ 2020年7月 **新規制基準**に基づく**安全審査に合格**し(事業変更許可)、**設計及び工事の計画の認可と使用前事業者検査**を残すのみ
 - 2026年度中の竣工を目標



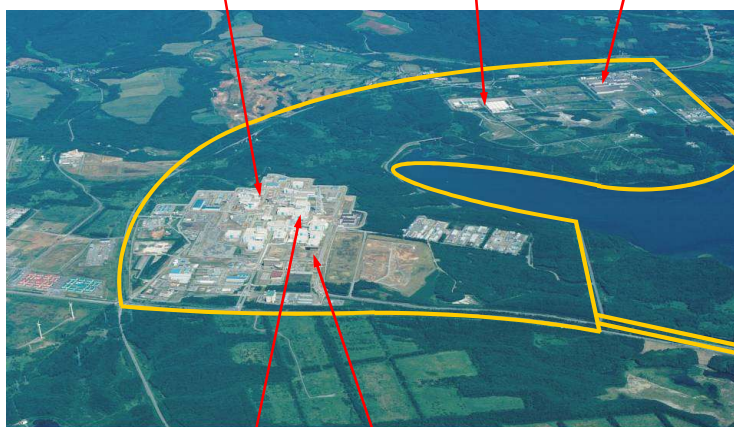
16

六ヶ所原子燃料サイクル施設

返還HLW管理センター

LLW埋設センター

ウラン濃縮工場



再処理工場

MOX燃料工場建設地点

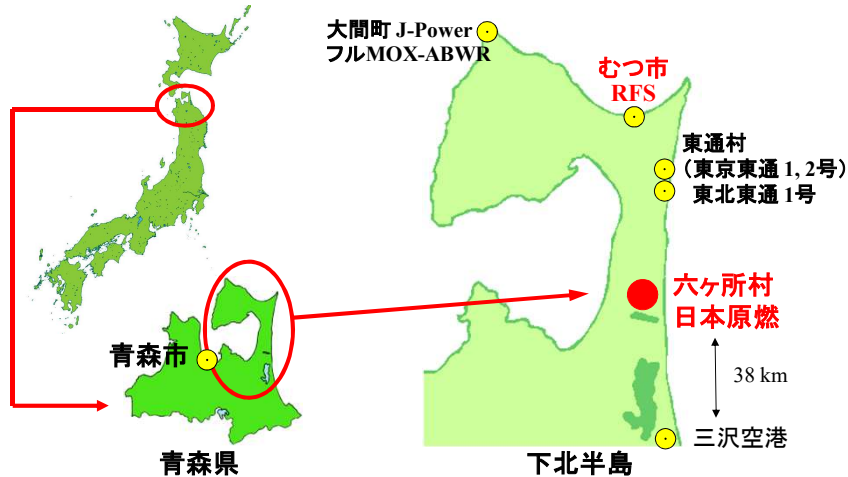
むつ小川原
港へ

17

青森県に立地する原子力施設

■ 青森県下北半島には、原子燃料サイクルの枢要施設が立地

六ヶ所村(再処理工場、MOX燃料工場、濃縮工場、廃棄物埋設・貯蔵施設)、むつ市(東電・原電の中間貯蔵施設)、東通村(東北電力のBWR原発)、大間(電源開発のフルMOX-ABWR)、等



18

プルサーマルの資源節約効果

■ 軽水炉の使用済燃料の組成

- ◇ 4.5%の原子核が核分裂(燃焼率 4.5%)
 - 3%は、ウラン原子核(主として ^{235}U)が直接に核分裂
 - 1.5%は、 ^{238}U がプルトニウムとなってから核分裂したもの
- ◇ 5%弱が、高レベル廃棄物(核分裂生成物とマイナーアクチナイド)
- ◇ プルトニウム(全Pu)が約0.9%、**核分裂性Puが約0.6%**
- ◇ ウラン(全U)が94%強、 **^{235}U が1%**程度残る(≒ 天然U近くまで劣化)

■ 使用済燃料を再処理して軽水炉燃料を再生

- ◇ プルトニウムを回収して、軽水炉用のMOX新燃料を作る: **プルサーマル**
 - 核分裂性Puの富化度を5%程度とすれば、 $0.6\% \div 0.05 = 12\%$
 - 即ち、**12%のウラン新燃料の節約**となる
- ◇ ウランを回収して再濃縮して新燃料を作る: **回収ウラン利用**
 - 94%の天然ウランを ^{235}U 濃縮度4.5%に濃縮(廃品濃度0.25%)すると想定
 - この計算より、**10%程度のウラン新燃料の節約**となる
- ◇ **合計 22%の資源節約**

19

天然ウラン価格の推移

- ウラン精鉱 (U_3O_8) で取引； 国内産出はなく専ら輸入「原子力は**準国産**」
 - ◇ 価格変動の原因は経済情勢、需要（先進国の原子力回帰、新興国の導入）、供給（鉱山事故、新規開発、核兵器解体）、在庫、原発事故、エネ政策、為替
 - ◇ 高騰しやすく、近年は**転換・濃縮の単価も上昇**



20

炉型の選択

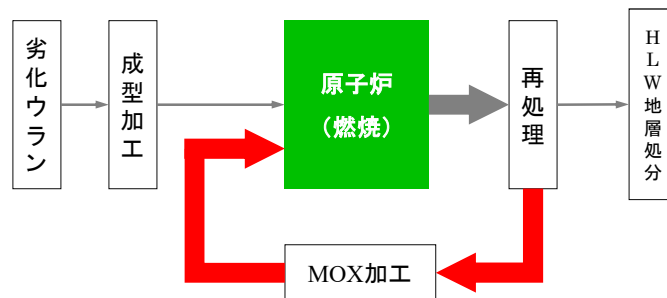
- 当面は軽水炉（大型次世代炉；革新軽水炉）とその核燃料サイクル
 - ◇ 先ずは**既設炉**の再稼働の促進； 許認可済未稼働、審査中、未申請
 - ◇ 次に現在**建設段階**にあるものを完成； 3基（島根3、大間、東京東通1）
 - ◇ **名前が報道**されたことのある新增設計画を革新軽水炉に； 9基
 - 敦賀3・4、上関1・2、川内3、美浜4、浜岡6、東京東通2、東北東通2
- 小型炉（SMR）の国内建設は無い
 - ◇ **立地の効率性**、経済性、等々を考慮
 - ◇ 特に**大型炉の共同建設**と比べて選ばれる理由が全く無い
- 高温ガス炉も選択されない
 - ◇ **小型炉**の短所を負う
 - ◇ 高い濃縮が必要、使用済燃料の**再処理が困難**（直接処分）
 - ◇ 水素市場での競争力が見通せない（**座礁資産化**の恐れ）、等々を考慮
- 今世紀後半は高速炉とその核燃料サイクル
 - ◇ **Pu増殖**により原子力を準国産から純国産へ； ウラン調達に依存しない

21

高速炉の燃料サイクル

- 高速増殖炉は、エネルギーを発生しつつ、消費した燃料物質よりも多くの新しい燃料物質を作り出すことができる

- ◇ 増殖比を1.0強にすればリサイクル中のロスがあってもPu燃料を自給可能
- ◇ 上流からは、ブランケットで消費した ^{238}U を補う分だけ劣化ウランを供給
- ◇ 劣化ウランは、濃縮の廃品として既に大量に国内に保管されている
- ◇ 新しいウランの輸入量を極端に減らすことが可能(当面はゼロでよい)



22

天然ウラン資源利用率の比較

- 軽水炉のワンス・スルー(使用済燃料は再処理せず直接処分)

- ◇ 天然ウランの ^{235}U 濃度 0.711%、濃縮工程の製品濃縮度 4.5%、廃品濃度を 0.25% として;
 - 原料・製品比率 $F/P = (4.5 - 0.25) \div (0.711 - 0.25) = 9.219$
- ◇ 転換ロス 0.5%、加工ロス 2.5%、燃焼率 4.5% として;
 - 天然ウラン利用率 $= 1 \div 1.005 \times 0.975 \div 9.219 \times 0.045 = 0.0047 \rightarrow$ **約 0.5 %**

- 軽水炉のリサイクル(1回だけリサイクル)

- ◇ プルサーマルと回収ウラン利用の合計で **22%の資源節約**の結果;
 - $0.005 \times 1.22 = 0.006 \rightarrow$ **約 0.6 %**

- 高速炉のリサイクル(無限リサイクル)

- ◇ リサイクルロス 5%、燃焼率 10% として;
 - 1回のリサイクルによる燃料の再生は $(1 - 0.1) \times 0.95 = 0.855$
- ◇ 無限リサイクルによるウラン資源の利用率は;
 - $0.1 + 0.855 \times 0.1 + 0.855^2 \times 0.1 + 0.855^3 \times 0.1 + 0.855^4 \times 0.1 + \dots$
 $= 0.1 \div (1 - 0.855) = 0.69 \rightarrow$ **約70%**
- ◇ 天然ウランの**利用可能年数は100倍**に延びる

23

天然ウランの利用可能年数

■ 天然ウランは $^{235}\text{U} : ^{238}\text{U} = 0.7\% : 99.3\%$

- ◇ 利用可能年数(可採年数)＝確認可採埋蔵量÷現在の年間生産量
- ◇ ^{235}U しか使わなければ、燃料加工段階などでロスがあるため、天然Uの0.5%程度しか利用できず、その利用可能年数(＝可採年数)に、火力発電の化石燃料の可採年数と比べ**優位性がない**
- ◇ しかし、 ^{238}U をPuに変えて使うことを続ければ、天然Uの利用可能年数は**100倍程度**に延び、実質的に資源制約から解放

	天然ウランの利用率	利用可能年数
軽水炉 (ワンススルー)	0.5 %	約132年
軽水炉 (プルサーマル)	0.6 %	約160年
高速炉	70 %	数千年

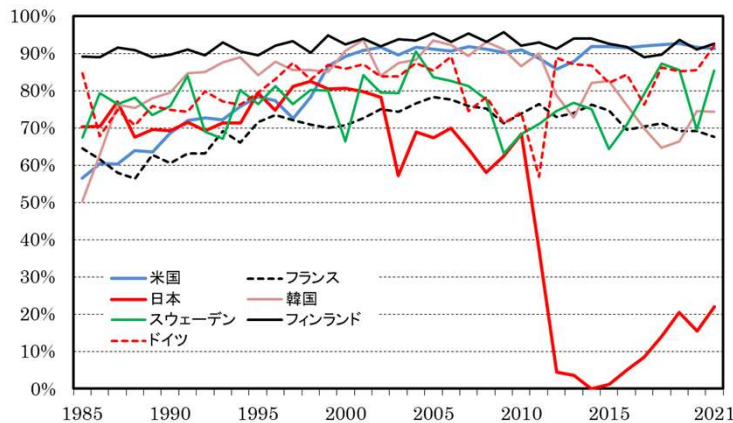


24

原子力先進国の設備利用率の推移

■ 原子力先進国の設備利用率は高い

- ◇ フィンランドは殆ど90%以上、米国も過去20年間90%程度
- ◇ 日本は福島第一事故の前でも、2000年代初頭を過ぎ70%以下で劣等生
- ◇ 日本は福島第一原発事故後は悲惨だが、世界は殆ど無関係



25

再稼働と新規建設のイメージ(日本)

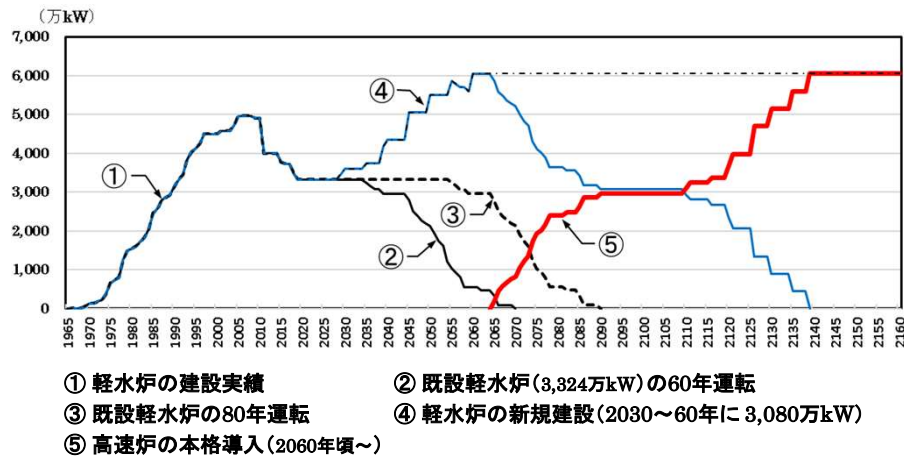
時期	再稼働・新設基数	原子炉	出力増分 (万kW)	累積出力 (万kW)
～2030年	27基	稼働済12基＋待機中5基 ＋審査中10基	2,775	2,775
～2035年	9基 (未申請の既設炉)	女川3、柏崎刈羽1～5、浜岡5、 志賀1、東京東通1	963	3,738
～2040年	4基 (福一事故前に 設置許可申請済)	敦賀3・4、上関1、川内3	604	4,342
～2045年	5基	美浜4、浜岡6、東京東通2、 東北東通2、上関2	713	5,055
～2050年	3基	N1、N2、N3	450	5,505
～2055年	3基	N4、N5、N6	450	5,872
～2060年	3基	N7、N8、N9	450	6,047
2060年以降	高速炉	80年到達炉のリブレース		

既設炉の運転期間(60年vs.80年)

- 既設炉の廃止は、新增設の効果を相殺してしまう
 - ◇ 運転継続で営業CFを稼ぎ、投資CFを生み出すのは経営のイロハ
 - ◇ リブレースを期待して廃炉すれば、むしろ新規建設の目を潰す
 - ◇ 新規建設より廃炉の復活の方が安い可能性あり(米国Palisades原発)
- 新增設による原子力規模の倍増には**既設炉80年運転**が必要

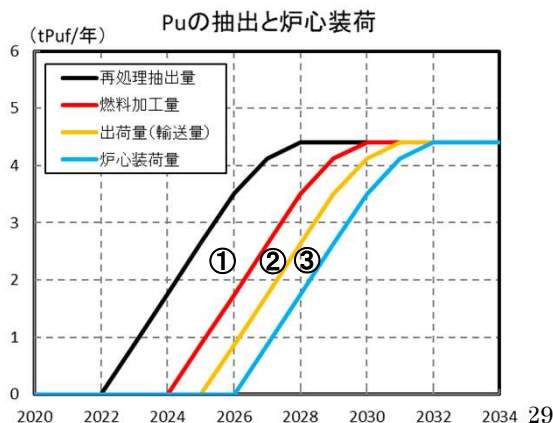


軽水炉の新增設と高速炉の本格導入

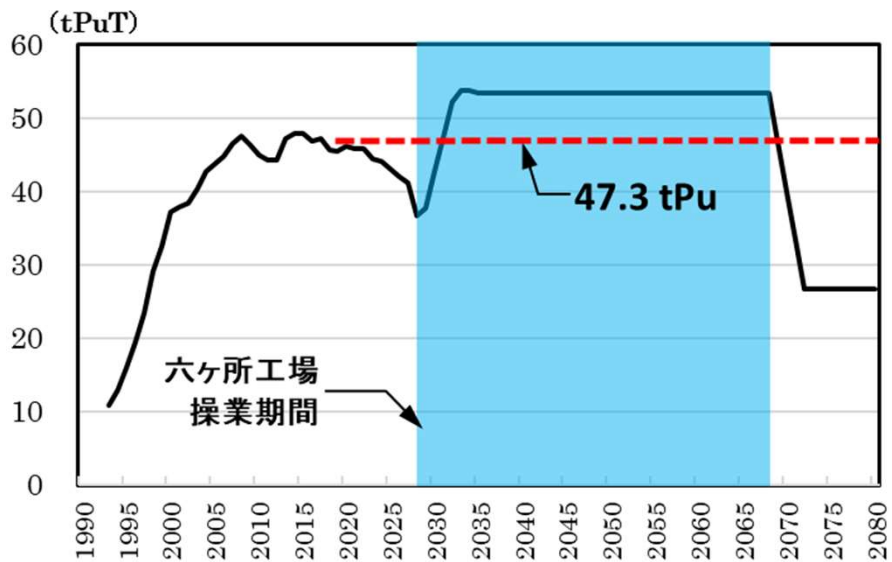


分離Pu保有量が増える仕組み

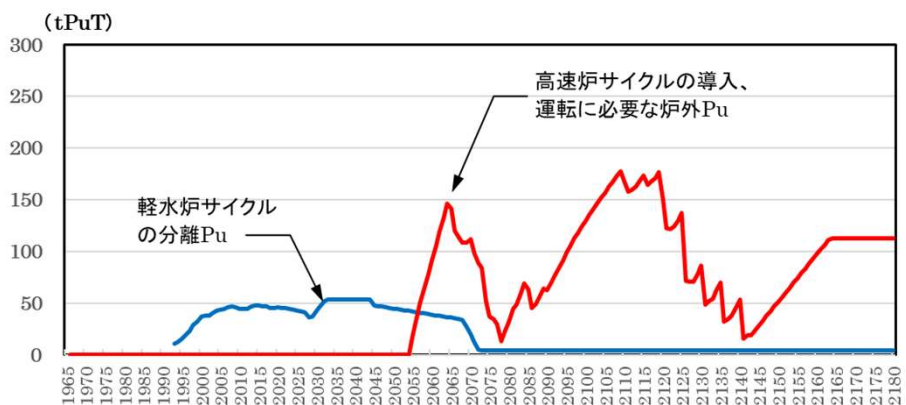
- 再処理で抽出された分離Puが原子炉で消費されるまでの形態
 - ① 再処理抽出量とMOX燃料加工量の差 = **原料在庫**(MOX粉末)
 - ② MOX燃料加工量と製品出荷量の差 = **製品在庫**(MOX燃料集合体)
 - ③ MOX燃料出荷量と炉心装荷量の差 = 発電所に届き、**装荷待ち**の製品
- ①+②+③が分離Pu
 - ◇ 再処理工場が操業開始すると我が国が保有する分離Puが一時的に増加
 - ◇ **再処理抽出量(t/年) = 炉心装荷量(t/年)** となって増加が止まる
- 再処理～炉心装荷を最速で3年としても;
 $6.6 \times 3 = 19.8$ tPuの増
 > 仏国にある**14.1 tPu**
 必ず **47.3 tPu** を超過



軽水炉サイクルの分離Pu



高速炉サイクルの炉外Pu保有量



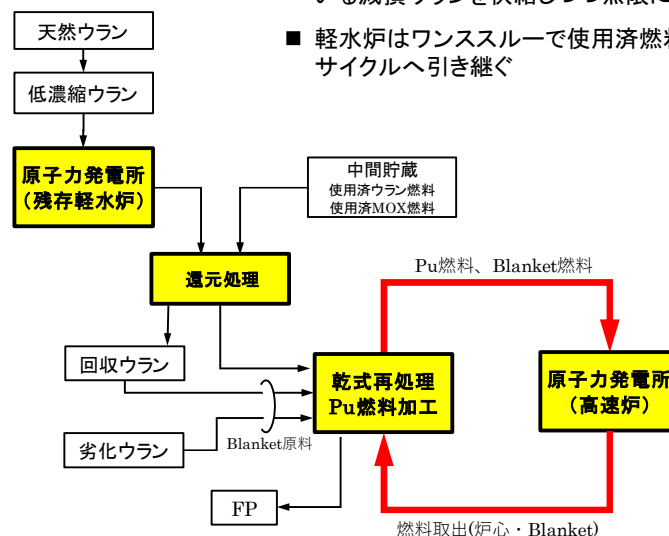
MA回収・炉内消滅の効果

- MAを除くことにより、高レベル廃棄物の**潜在的有害度**は著しく下がり、天然ウランと同等になるまでの期間を大幅に短縮
- 高レベル廃棄物の深地層処分により**地上の人が受ける放射線被ばく線量**が最大となるのは、処分位置からのCs-135の溶出・移動による影響で10万年後の 10^{-5} mSv/年という低さであり、高レベル廃棄物中のMAの有無は関係しない
- MAを除くことで高レベル廃棄物からの崩壊熱の発生量が減り、**処分場の面積**を著しく小さくできるか、または**第二処分場の必要時期**を大幅に先送りすることができ、**立地が容易化し、処分コストが縮小**する
- 使用済燃料中のMAを、U・Puと共に**新燃料の中に回収**すれば；
 - ◇ MAを炉内燃焼して**消滅**できる（燃料として発熱し天然ウラン資源を**節約**）
 - ◇ 新燃料が強い放射線を持つことで**核不拡散性**が向上（分離Puとならない）
- 金属燃料高速炉の**乾式再処理**はU・Pu・MAを共抽出し燃料加工

32

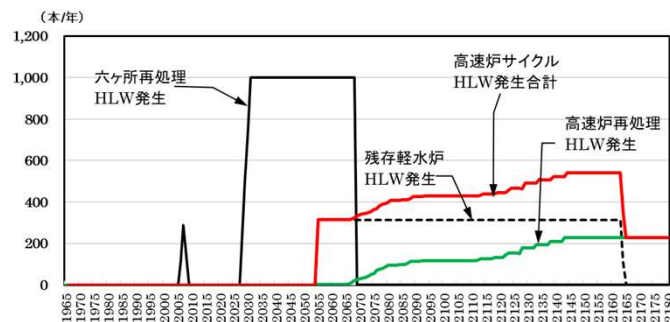
高速炉の核燃料サイクル

- 高速炉とその核燃料サイクルは国内に蓄積している減損ウランを供給しつつ無限にリサイクル
- 軽水炉はワンスルーで使用済燃料を高速炉サイクルへ引き継ぐ



高レベル廃棄物の削減

- 乾式再処理ではMAが同時に**回収**され燃料として**リサイクル**
 - ◇ 高レベル廃棄物として地層処分が必要となるのは**FPのみ**
 - ◇ MAを含有しない高レベル廃棄物は**発熱量**が低く、廃棄体のFP**充填密度**を高め、**処分本数**を減らすことが可能
- **仮に1/2に減らせるとすれば、第二処分場の必要時期は100年先**
 - ◇ **100年間の冷却期間**で、処分場面積は **1/10** との報告もある（仏CEA）



34

まとめ

- 世界の脱炭素の実現性には疑問あり、**原子力は必須**
- 原子力を長期に利用するにはワンスルーでは駄目で、核燃料の**再処理・リサイクルが必要**
- 現在の核燃料サイクルは軽水炉の**プルサーマル**だが、天然ウラン資源の節約効果は小さい
- 長期的には**高速炉**とその核燃料リサイクルが必要だが、その本格導入には大量の**Puの準備**が必要
- **乾式再処理**によるMAの同時回収、燃料加工、炉内燃焼は、**核不拡散性**に優れ、**最終処分負荷の軽減**、核燃料サイクル**コスト低減**の観点でも理想的

35