

(1) 核燃料サイクル開発への提言

—「究極のゴミ焼却発電炉」: 高速増殖炉開発における新しい視点—

日本原子力学会2019年秋の大会

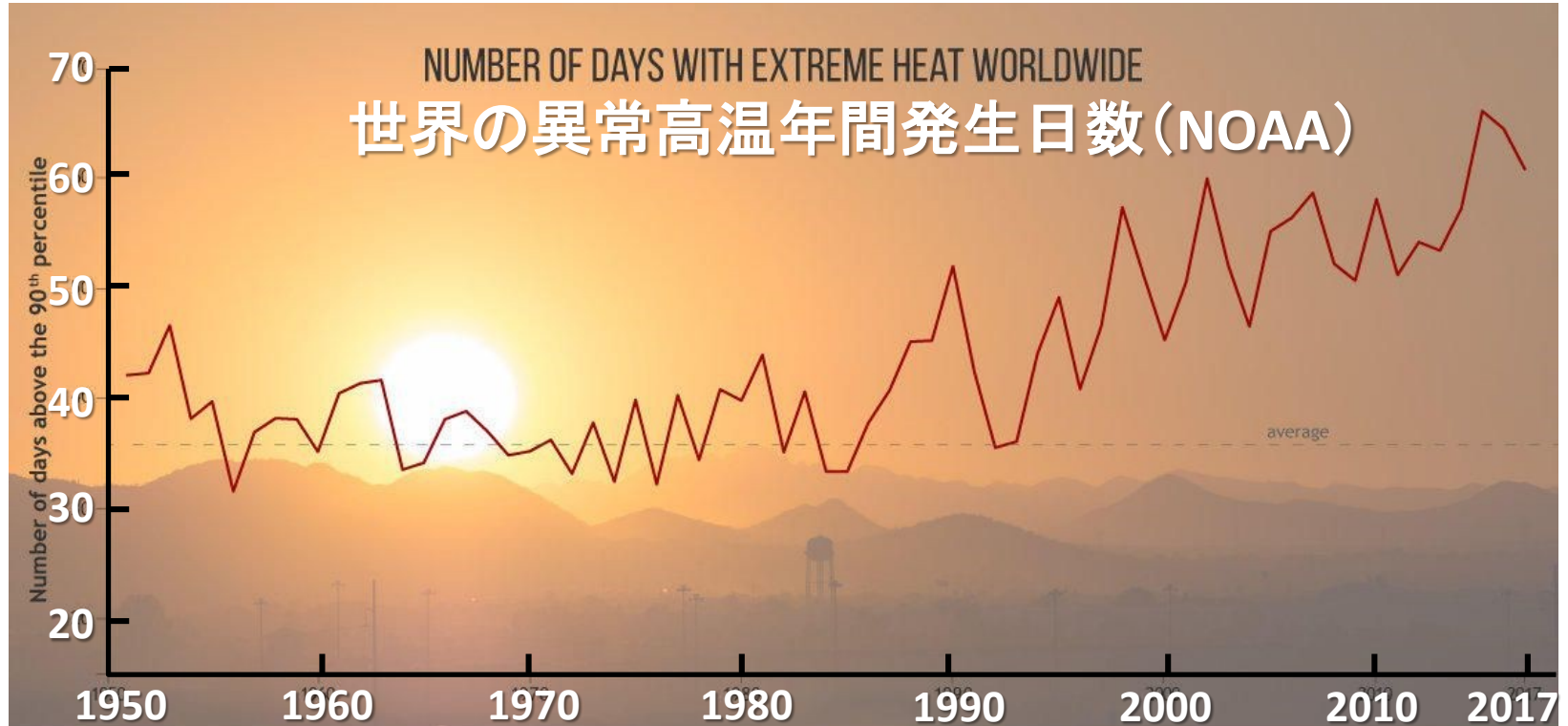
新型炉セッション

今後の新型炉サイクル開発への提言(私たちの経験を踏まえて)

2019年9月12日

河田東海夫

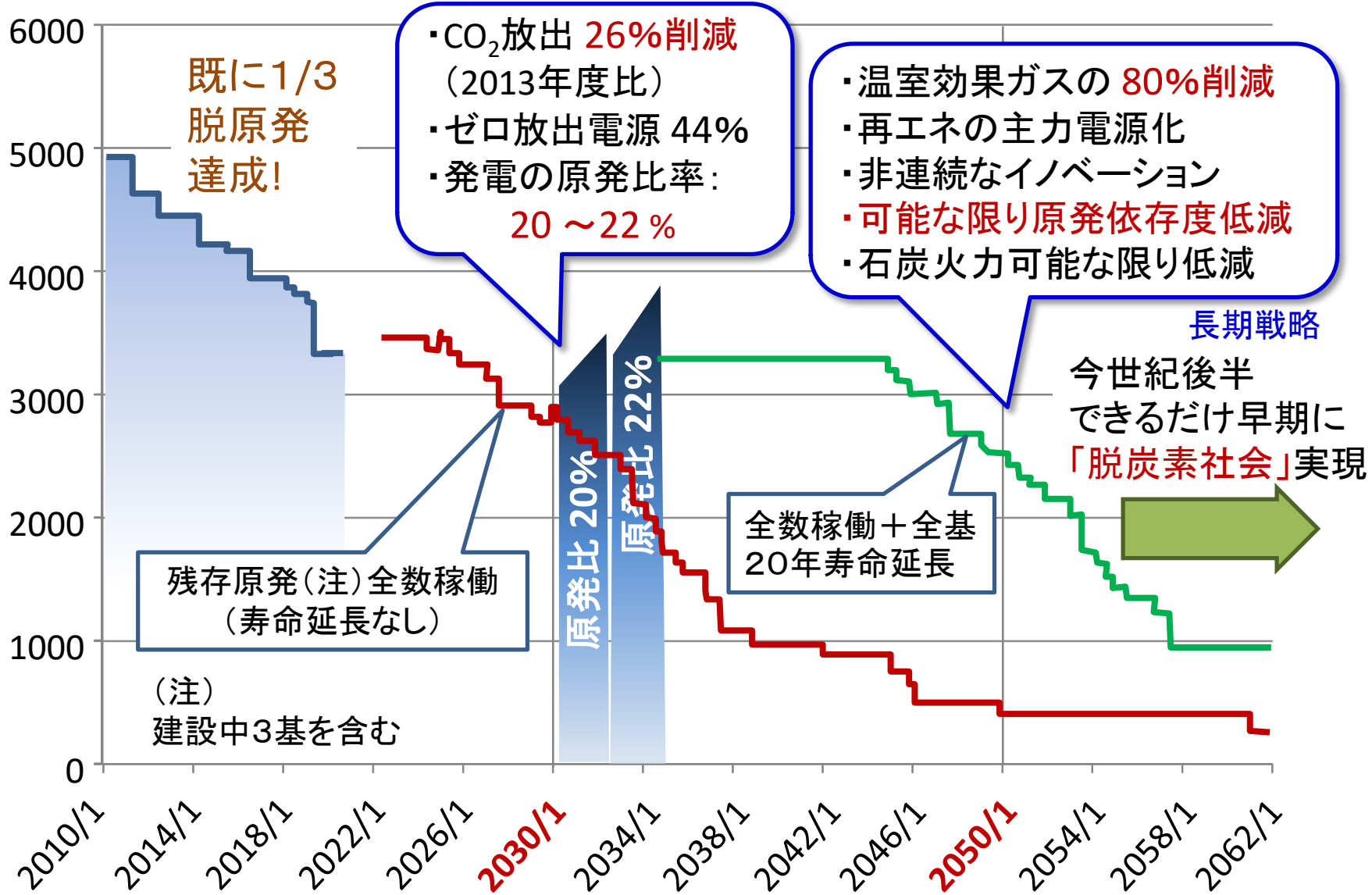
先送りは許されない脱炭素社会実現



- 昨年日本は記録づくめの暑い夏を体験
- 今年は欧州で異常熱波、7月の世界平均温度は史上最高
- 狂暴化・常態化する異常気象災害
- 気候変動は世界が「今直面している危機」
(グテーレス国連事務総長@TICAD7, 2019/8/29)

我が国の温暖化対策と原発設備容量

残存原発合計設備容量, 万kW

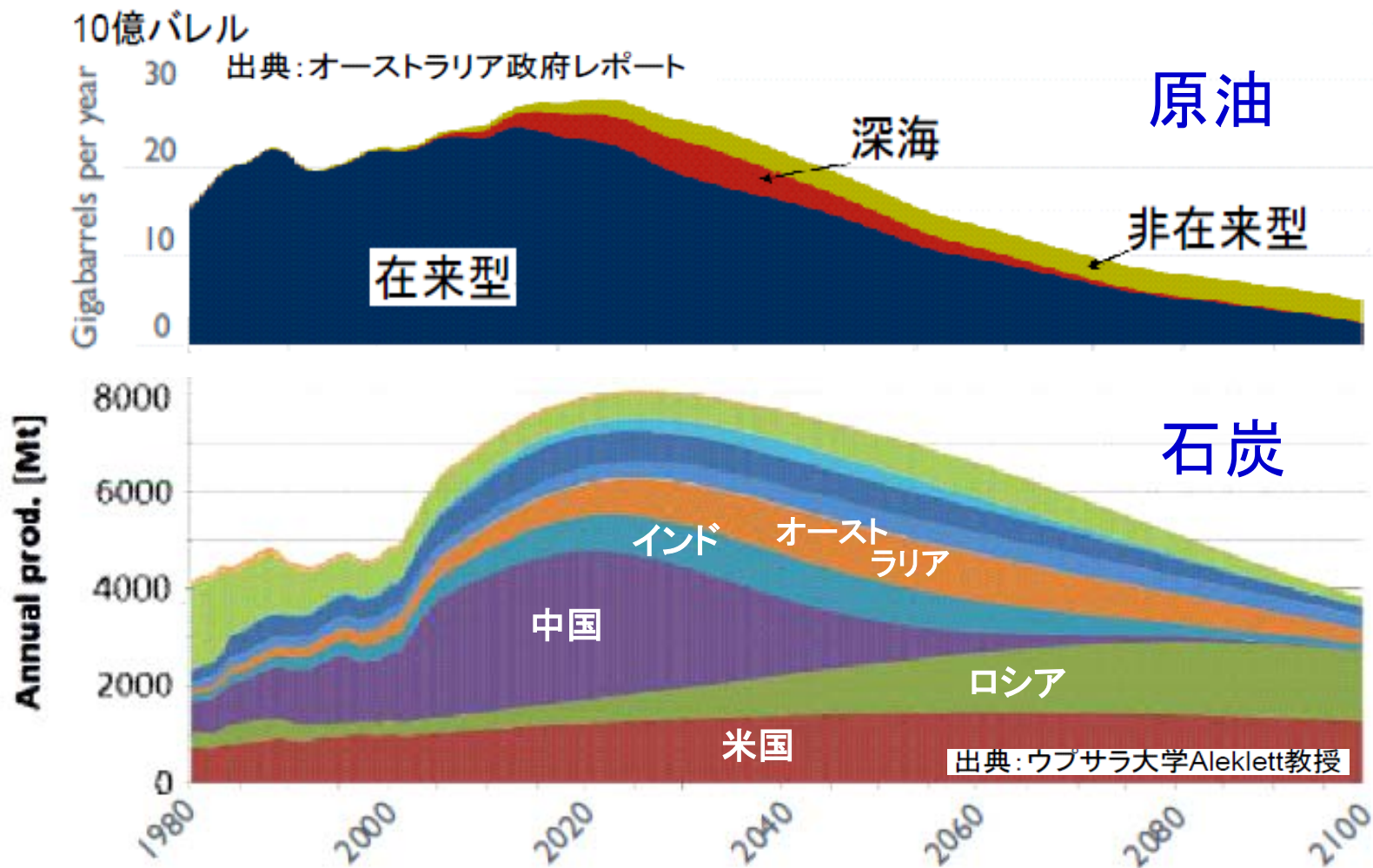


本格的脱炭素化に向けて各方面から 原子力の重要性再評価の声

- **ビル・ゲイツ 2019年1月2日ブログ**
 - 原子力は気候変動対応に理想的な解だ
- **サイエンス誌2019年1月号社説**
 - 脱炭素化に向け、既設原発温存と、新設が必要
 - 脱原発リスクに直面する日本、韓国、ベルギー、スペイン、スイスでは、強力な対応策が必要
- **IEAクリーン・エネルギー報告(2019年5月28日)**
 - 先進国の原発閉鎖加速傾向は、脱炭素社会へのタイムリーな移行の障害要因
 - 原発維持のための政策支援を提言
- **米国の反原発団体「憂慮する科学者連盟」(UCS)**
 - 温暖化対策のため、原発温存支持に方針転換



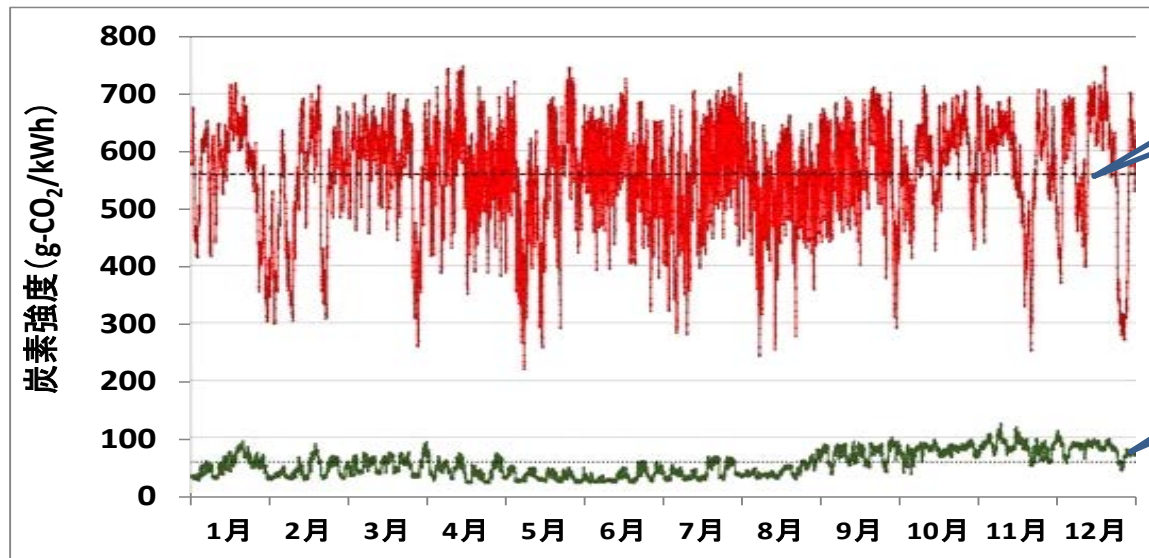
世界の化石燃料生産長期見通し



日本では一定規模の原子力への長期依存は不可避

- ① 本格的脱炭素社会への備え
- ② エネルギー自給率10%未満という現実と、石油・天然ガス生産減退時代への備え
- ③ 国費流出抑制と電力価格高騰回避
→ 国際競争力低下回避
- ④ 変動型再エネの実力の限界

単位発電量
当たりの炭酸
ガス放出量
(2016年)



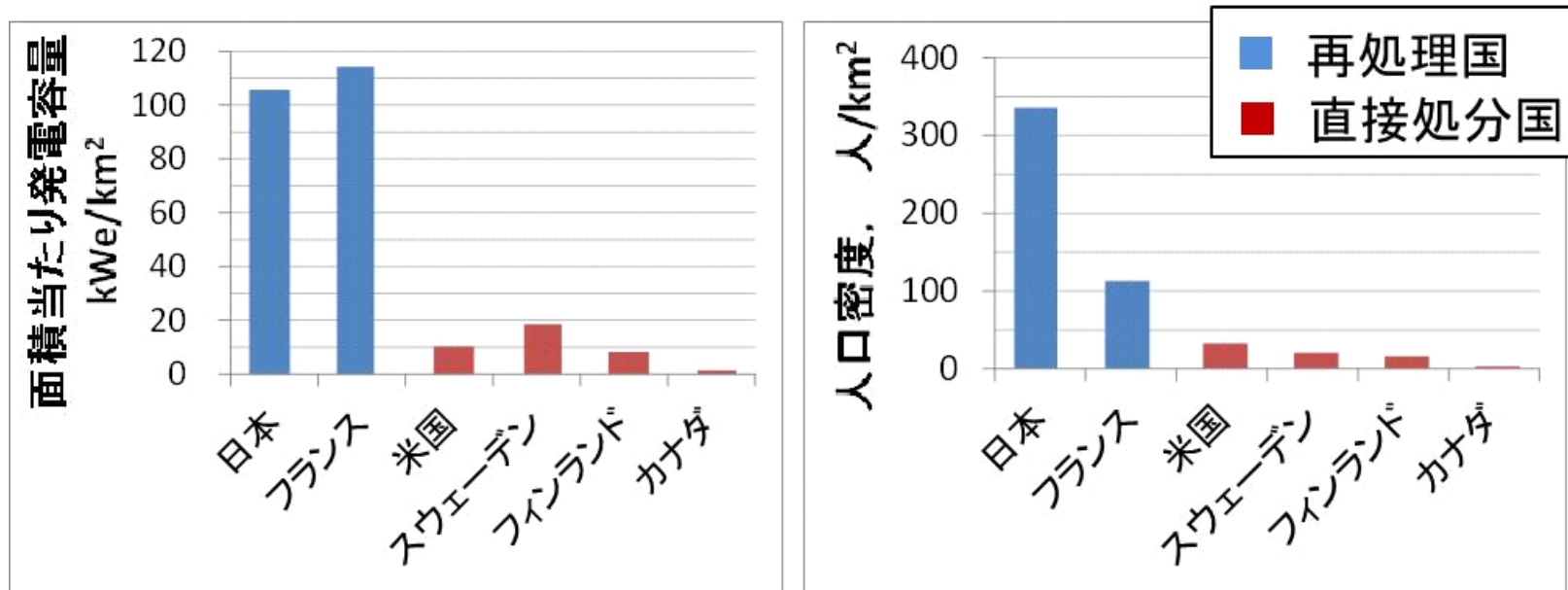
再エネだけ
の優等生
ドイツ

原子力
優等生
フランス

原子力への長期依存を可能とするためには、再処理路線堅持が不可欠。その5つの理由は:

- ① 高レベル廃棄物処分場の必要面積が1/3で済む
 - ② 埋設廃棄物の放射性毒性とその有意残存期間を一桁小さくできる
 - ③ 多数の大型SF中間貯蔵施設の建設が不要で、中間貯蔵能力確保の必要性がミニマムで済む
 - ④ 将来世代に制御不能な核拡散リスクを押し付けるプルトニウム鉱山を残さない
 - ⑤ 資源節約ができ、高速増殖炉サイクル(FBRサイクル)への橋渡しができる
- ①～③はいずれも立地問題の負担を大きく軽減
 - 国土の狭い日本では、立地問題の負担が小さい施策が最良の選択肢

原子力推進土壤の大きな日米間格差

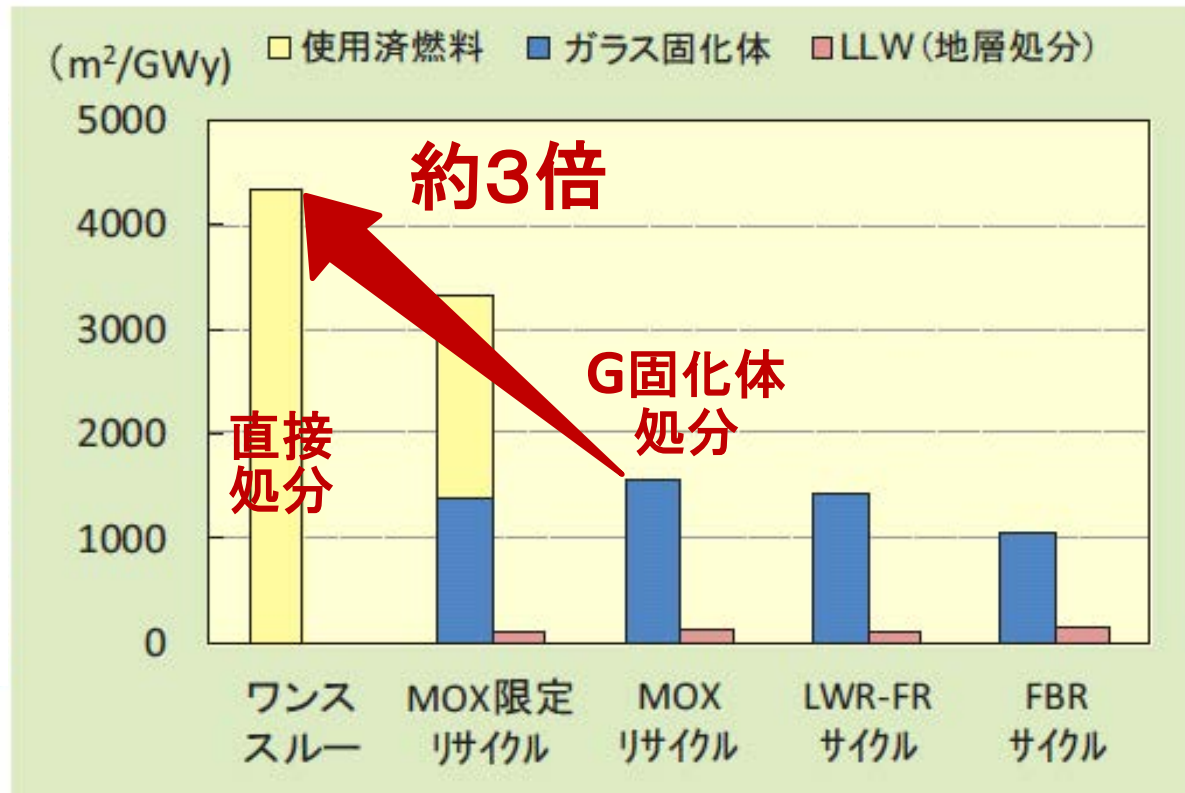


- 国土の単位面積当たりの原発設備容量：日本は米国の10倍 → 面積当たりの廃棄物発生量も10倍
- 人口密度：日本は米国の10倍 → 原子力立地の困難さも(多分)10倍
- 日本が原子力の長期安定利用を進めるためには、多少経済負担が増えても、処分場や立地問題の負担が小さくて済む道を進むのが良策

日本には直接処分方式は馴染まない(1)

- 直接処分では発熱体のPuも同時に埋めてしまう
- このため、処分場必要面積が再処理方式の約3倍
⇒ 処分場用地確保の困難性が格段に高まる

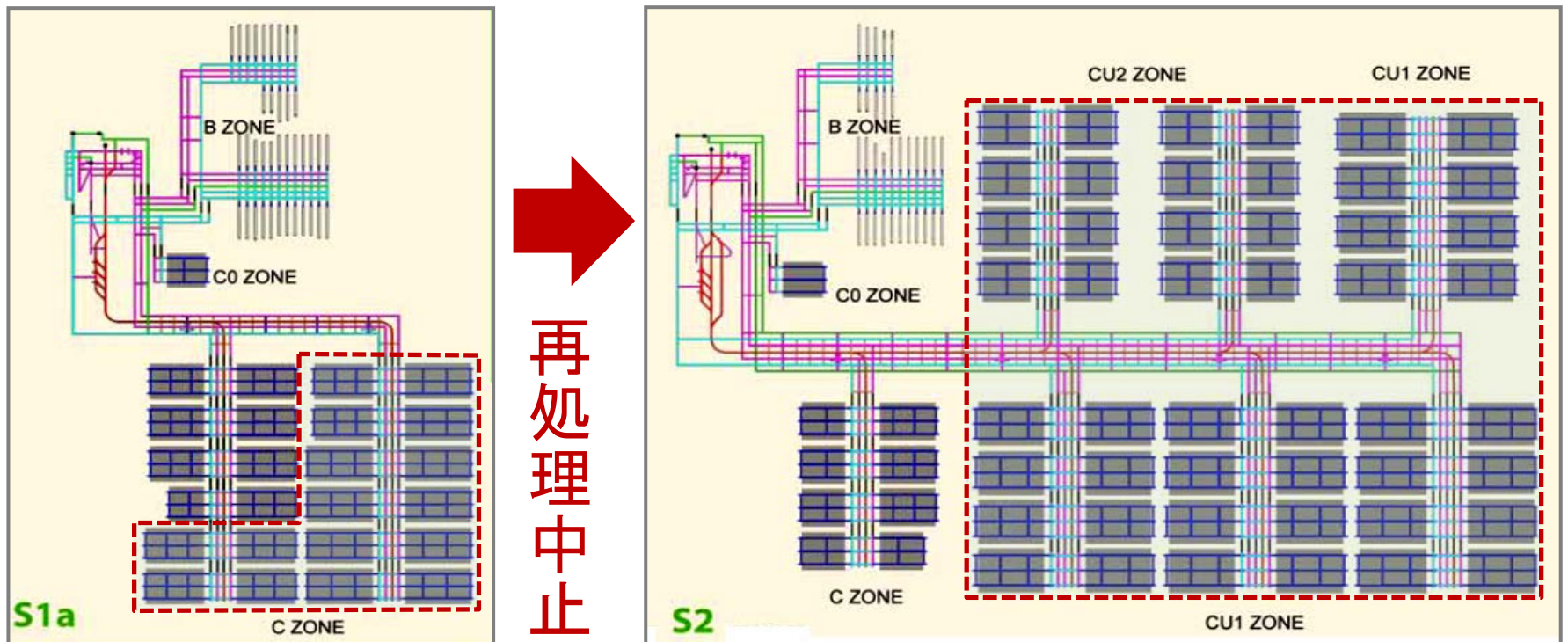
単位発電量当たり
処分場必要面積




原子力委員会 原子力
発電・核燃料サイクル
技術等検討小委員会
(平成24年6月5日)

フランスでも・・・

- 再処理を止めると、処分場必要面積は**4倍**！



 の部分で比較

(Dossier 2005 Argile より)

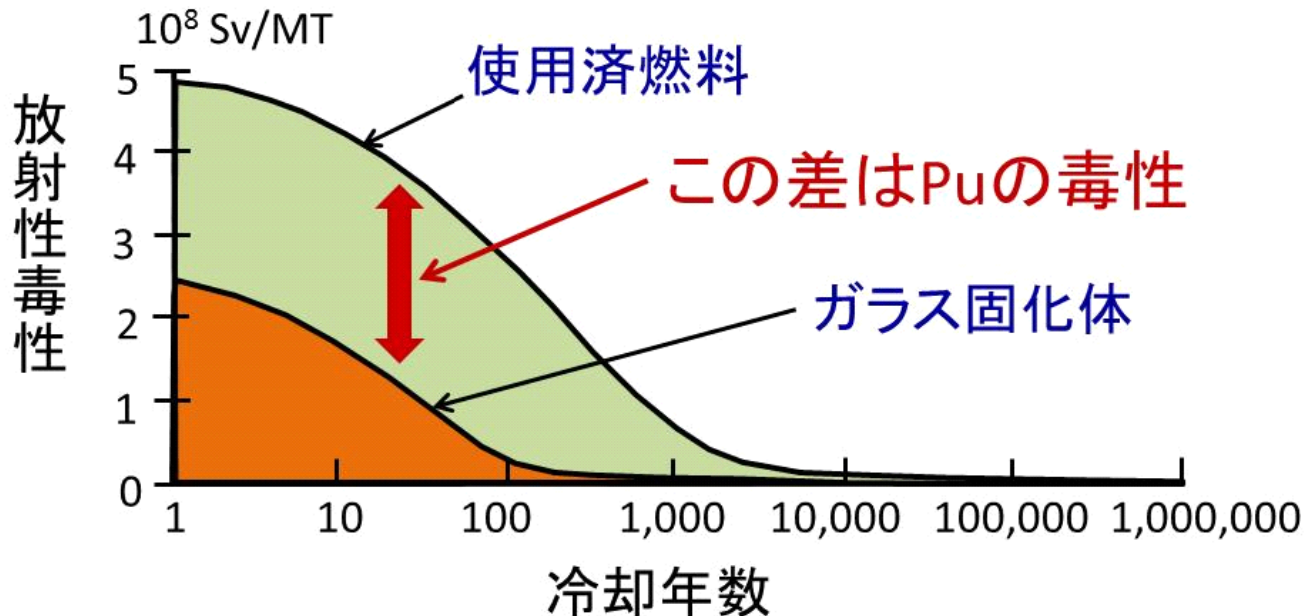
日本には直接処分方式は馴染まない(2)

- 直接処分の場合


- Puをそのまま埋める
- ガラス固化体処分に比べ埋設廃棄物の毒性は10倍以上(埋設後100年以降)
- 有意な毒性継続期間も一桁長くなる

あなたの裏庭
にPuを埋めさ
せてください

処分場
立地の
困難性
が格段
に高まる



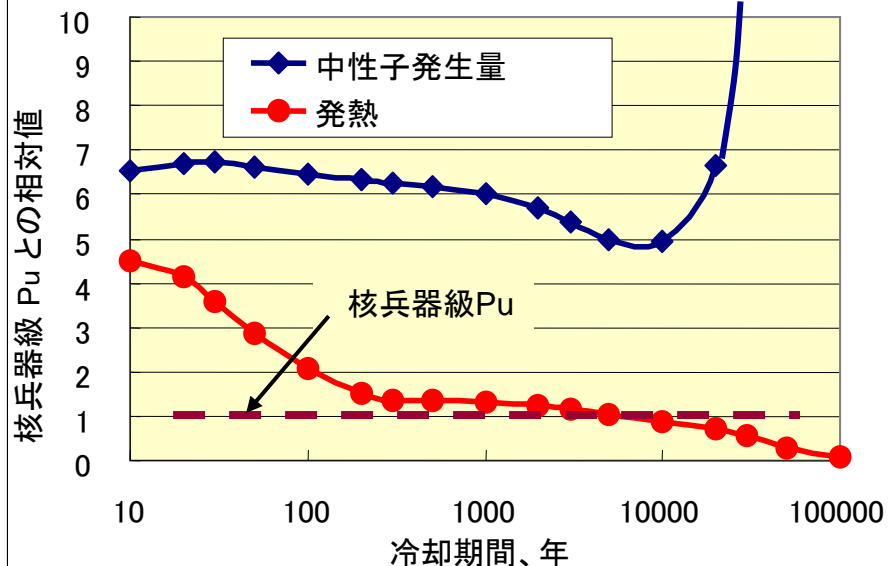
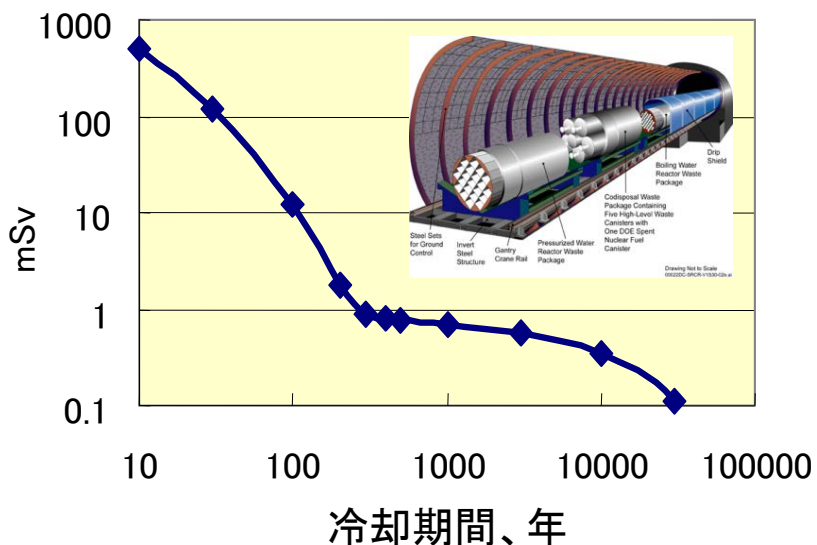
日本には直接処分方式は馴染まない(3)

- 原子力比率20～22%とは
 - 100万kW級原発35～38基(70%稼働率)
 - 使用済燃料(SF)年間発生量600トン前後
- 
- 直接処分の場合、処分前にSFを50年間冷却するための中間貯蔵施設が必要
 - むつりサイクル燃料備蓄センター並の大型中間貯蔵施設(SF3000トン)を5年に1基ずつ作り続ける必要が生じる ⇒ 国土の狭い日本ではとても無理
 - 再処理方式堅持なら、これから40年間の再処理で発生するガラス固化体全量を貯蔵するための施設の敷地を六ヶ所に確保済み(一部施設建設済み)
⇒ 立地問題で悩む必要なし

プルトニウム鉱山問題

- 世界中が使用済燃料を直接処分した場合の、**21世紀末までのPu埋設量**
 - 全世界では **8,000~10,000トン**
 - 日本国内で、**約600トン**
- 300年後には、放射線レベルが十分下がり廃棄体への直接アクセスが可能になるとともに、Puの発熱も兵器級Pu並みに低下する
 - 将来のならず者国家にとって、兵器用材料としての魅力が増大

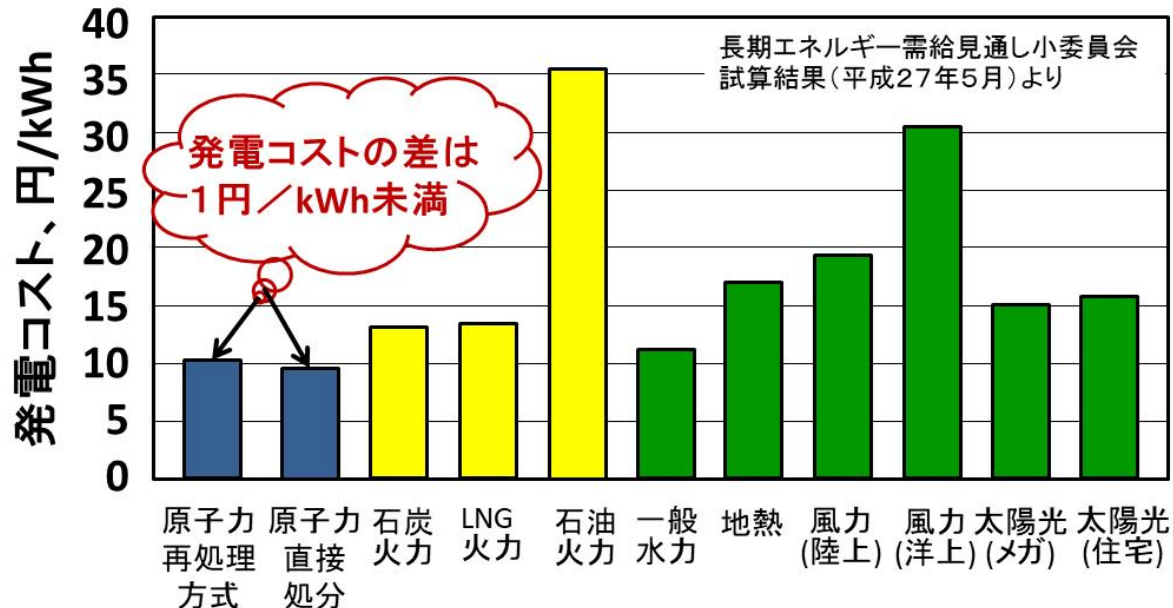
容器側面から1mの場所に
8時間立った場合の被ばく量



事実歪曲や偏見に満ちた再処理批判(1)

経済性批判:「再処理方式は直接処分方式に比べコストが高く、経済的に成り立たない」

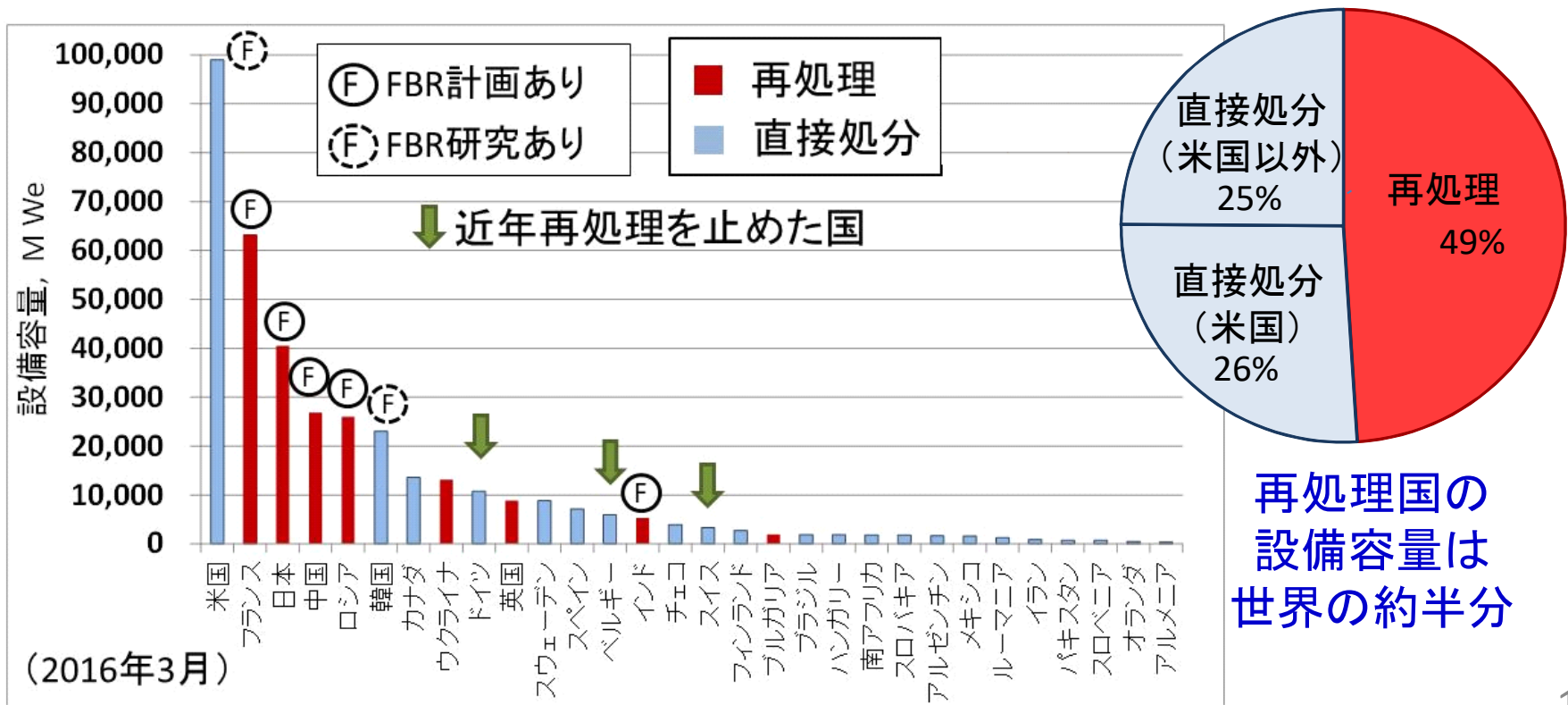
- 現実には、発電コストにすれば1円/kWh未満の差
- 他電源の発電コストとの差や、その揺れ幅と比べれば全く目クジラをたてる差ではない
- 再処理費用は、再処理等拠出金法で安定的に確保される仕組みができています(将来世代にツケを回さない)



事実歪曲や偏見に満ちた再処理批判(2)

多くの国が再処理から撤退している・・・？

- 原子力発電大国は再処理・リサイクル政策をとる
- 上位5カ国のうち、直接処分は米国のみ(⇔カーター政策の遺産)
- 近年再処理を止めたのは、脱原発国か小原発国のみ
- 設備容量で見れば世界の半分は再処理国



真に持続可能な原子力の実現に向けて(1)

- 持続可能な原子力の2つの基本要件
 - ① 燃料供給の長期安定性の保証
 - ② 放射性廃棄物処分が長期にわたり安定的に実施可能となる道筋の確立
- 軽水炉は上記2要件を満たさず、持続可能な原子力にはなり難い(⇔ 基本的にウラン食い散らかし炉)
 - ウラン資源利用効率は1%未満
 - 後に、膨大な量の未使用ウラン(濃縮テイルの劣化ウランや再処理回収ウランなど)と、大量のプルトニウムを残す
- ⇒ 軽水炉は経済性では優等生だがバックエンド的には劣等生
 - 採掘したウラン資源の99%を核のゴミにしてしまう
 - 生成したPuの後始末ができない体系(リサイクルしても5%しか減らない) ⇔ 極めて厄介な核のゴミ

真に持続可能な原子力の実現に向けて(2)

- MAリサイクル型高速増殖炉サイクルは持続可能な原子力の理想体系
 - ウラン資源(99.3%がU238)をプルトニウムに転換しつつ燃やし尽くすシステム
 - **ウラン利用効率**は工程ロスを見込んでも60%以上
⇒ **直接処分方式の軽水炉の100倍**
 - 既に地上に累積しているウランとプルトニウムだけで数千年の発電を可能とする(**新規のウラン資源採鉱は不要。濃縮も不要となる**)
 - **MAリサイクル**を行うことで、ガラス固化体の発熱低減が図れ、**高レベル廃棄物処分場の必要面積を軽水炉(再処理方式)に比べ約半分に縮減**できる(軽水炉直接処分と比べれば1/5~1/6)

30GWe, 100年間の原子力利用における サイクルオプション諸量のマクロ比較

核燃料サイクルのオプション	100年間に必要とする天然ウラン量	100年間に発生する高レベル廃棄物量	NUMO規模の処分場の必要基数	放射性毒性が元のウラン鉱石並みになるまでの年数	100年間に埋設するPu量	100年間に累積するサイクル残留物
軽水炉・直接処分	50万トン	使用済燃料 6万トン	5	10万年	600トン	劣化ウラン: 45万トン(注1)
軽水炉・リサイクル (一回リサイクル)	45万トン	ガラス固化体 67,000本 (3.4万トン)	1.7 (注2)	1万年	0	劣化ウラン: 40万トン(注1) 回収ウラン: 5万トン MOX-SF: 6400トン(注3)
高速増殖炉サイクル (MA90%回収・燃焼) (注4)	0 (注6)	ガラス固化体 63,000本 (3.2万トン)	0.8	1000年	0	軽水炉サイクルで残留する物質(用途がなければ核廃棄物)を燃料として利用することで順次減らしていける

(注1)濃縮のテイル

(注2)MOX使用済燃料は処分しない前提 → 高速炉導入期に再処理

(注3)SF=使用済燃料。530トンのMOX級Puを含む。MOX級Puは品位低下で実質的に核兵器転用不可

(注4)MA90%回収の目的は熱源除去 → 処分場利用効率向上

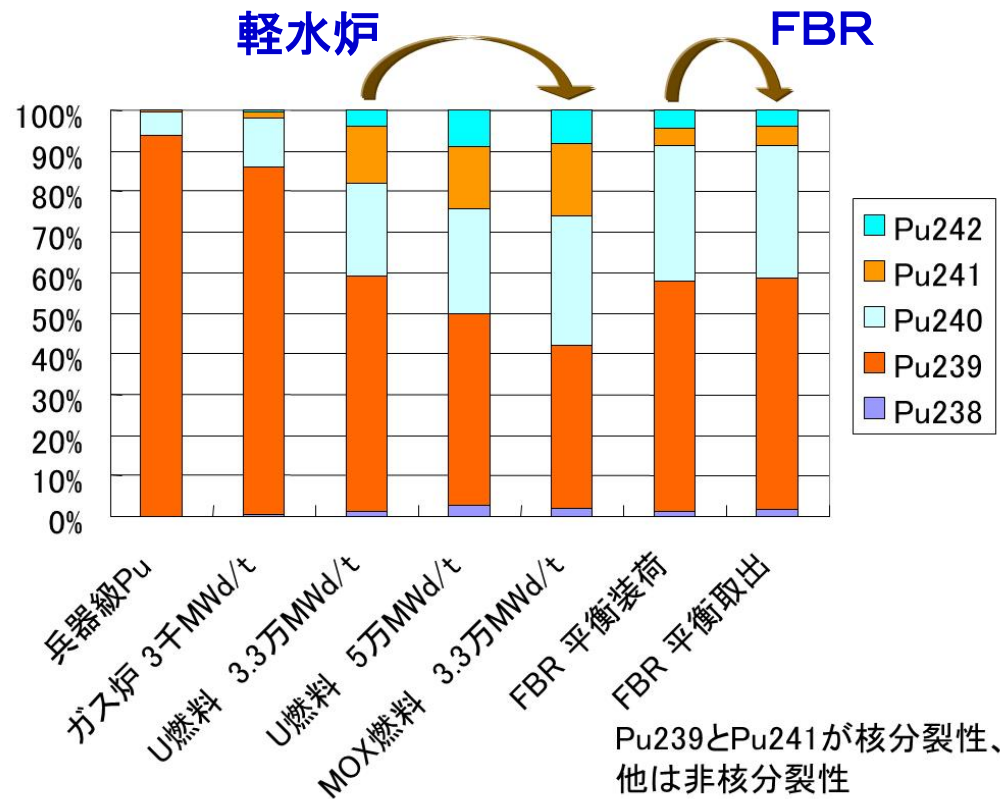
(注5)むつりサイクル燃料備蓄センター(貯蔵容量SF3000トン)

(注6)軽水炉時代が残すウラン、プルトニウムで間に合い、新規のウラン資源調達は不要

「ウラン使い尽くし」を可能とする鍵： Puの多重リサイクル

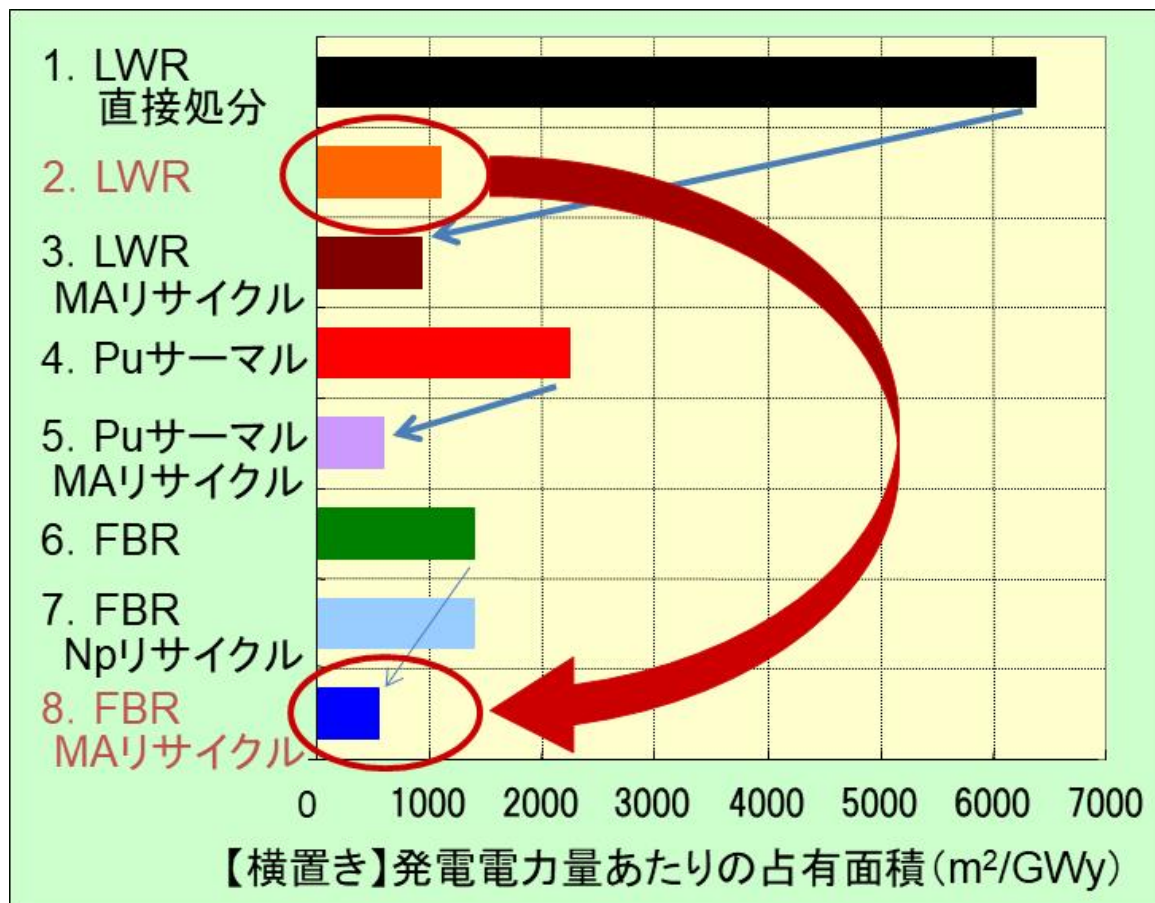
- FBRでは、炉心で品位低下するPuとブランケットで生産される高品位Puを混合しながら使用することでPu品位を一定レベルに保持できるのでPu多重リサイクルが可能

- 但し、ブランケットでの高品位Pu生産は、カットオフ条約(Pu240 7% 未満の兵器級Puの生産禁止)に抵触する可能性があり、この問題処理が極めて重要



MAリサイクル型FBRサイクルのHLW処分場 必要面積は軽水炉(再処理方式)の約半分

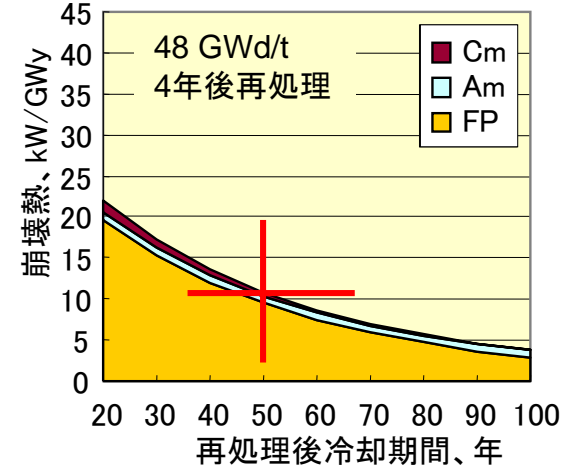
多様な核燃料
サイクルにおけるMA核変換の
意義
(JAEA評価)



- FBRのMA回収ガラス固化体の発熱は、軽水炉の固化体より小さくなるため、より密集した埋設が可能となる

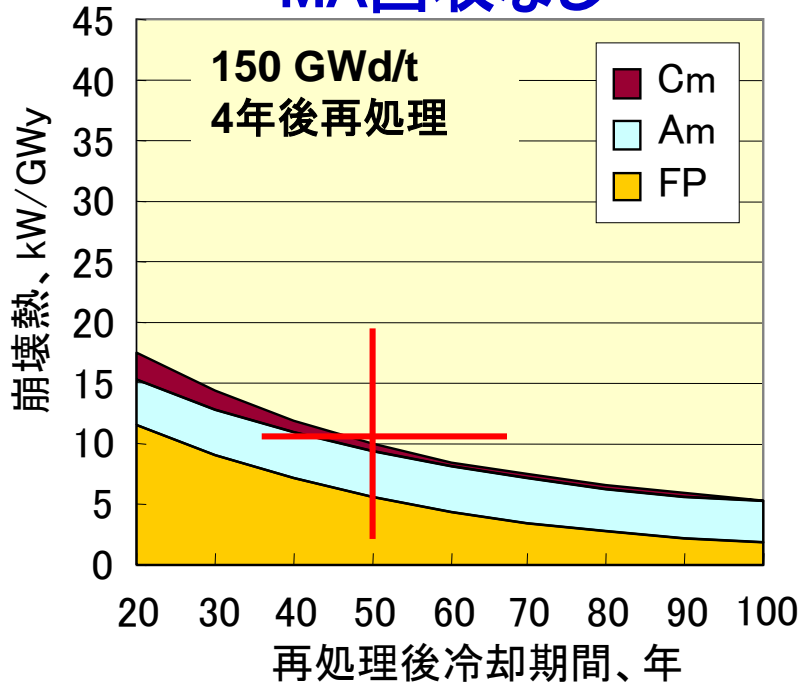
高速増殖炉燃料の再処理廃液の発熱

軽水炉ウラン燃料

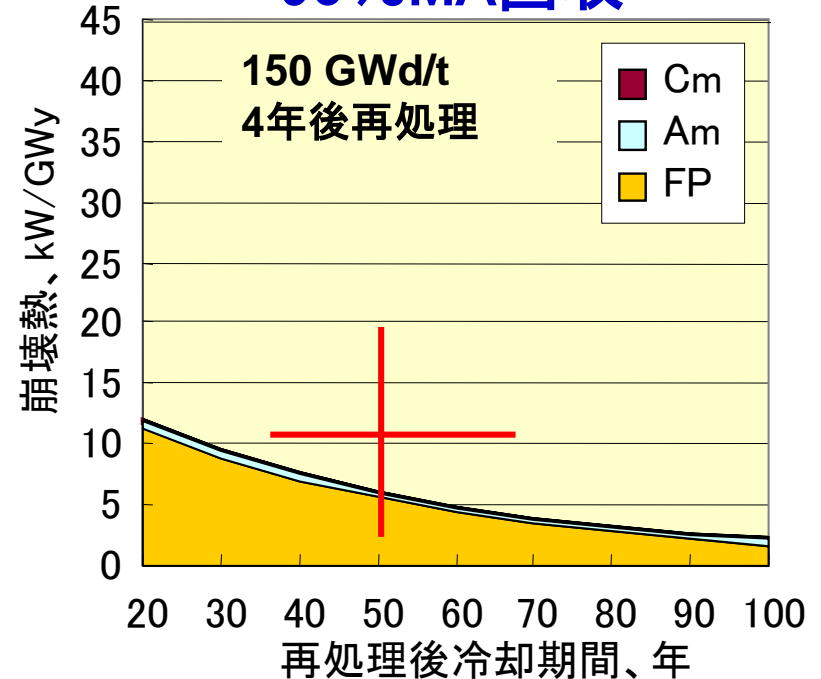


- MAを90%程度除去すれば軽水炉の6割程度になる

FBR 15万MWd/t MA回収なし



FBR 15万MWd/t 90%MA回収



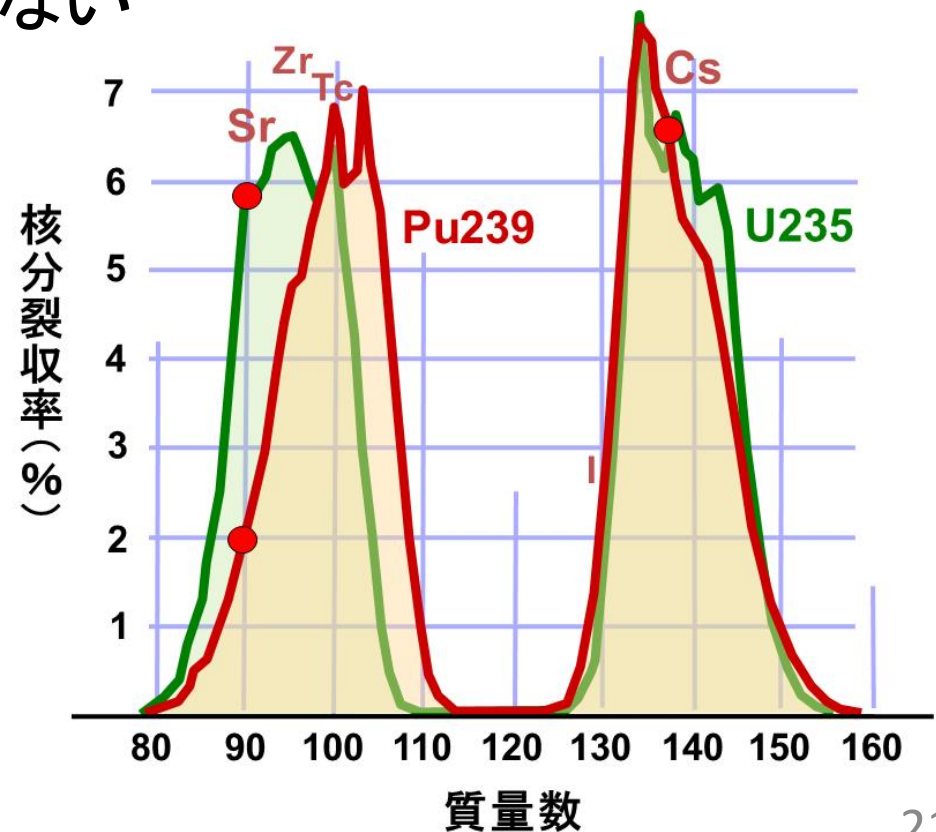
(注)FBRでは、炉心・ブランケット混合再処理

FBRのガラス固化体の FP発熱はなぜ低いのか？

- FBRは熱効率が高い(FBR 40% vs LWR 34%)
 - ⇒ FBRのほうが単位発電量当たりのFP発生量が軽水炉に比べ15%程度少ない

- Pu239の核分裂では
U235の核分裂に比べ
**Sr90(注)の発生割合が
1/3程度**

(注)Cs137と並ぶ主要な発熱核種



ところが・・・

「これだけ評判が落ちてしまうと、政治家はもはや応援のしようがない！」

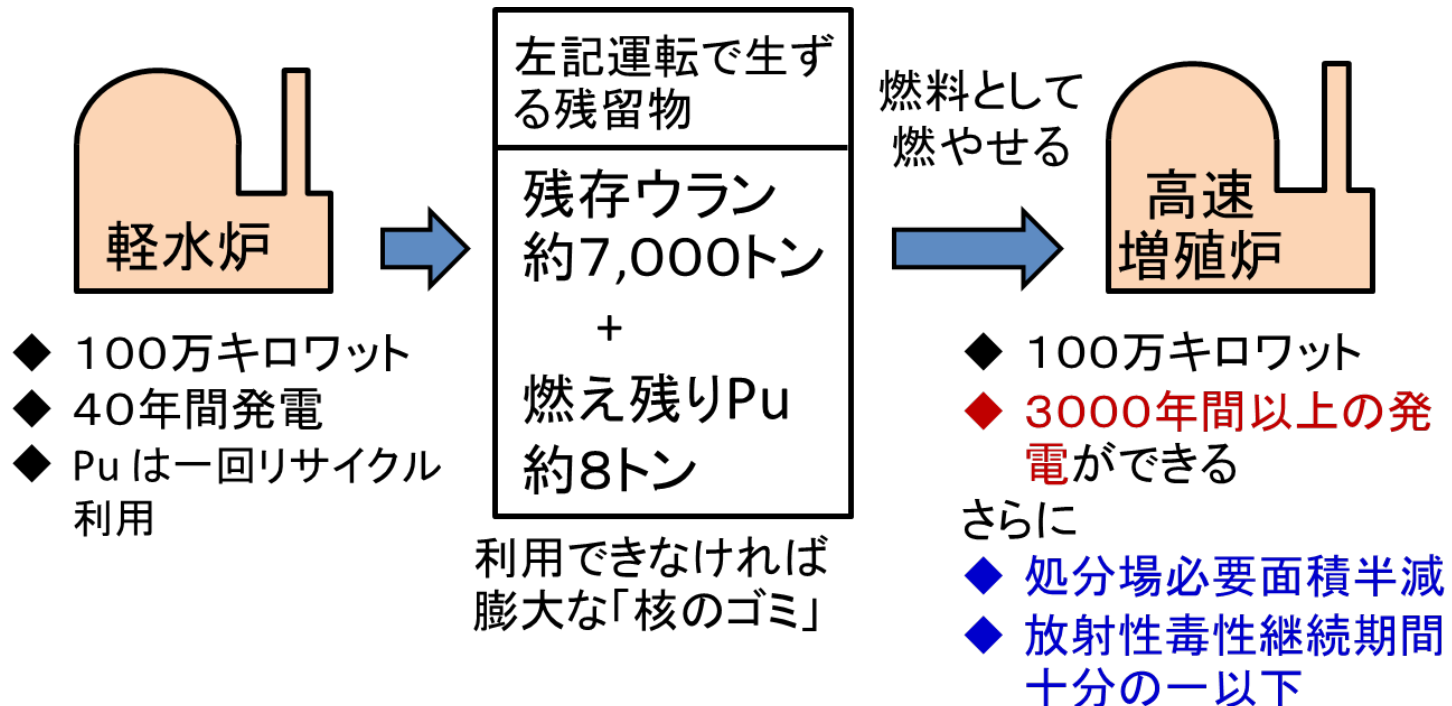
「これまでと違う新しいイメージで生まれ変われないのか？」

もんじゅ廃炉騒動時の某代議士の発言

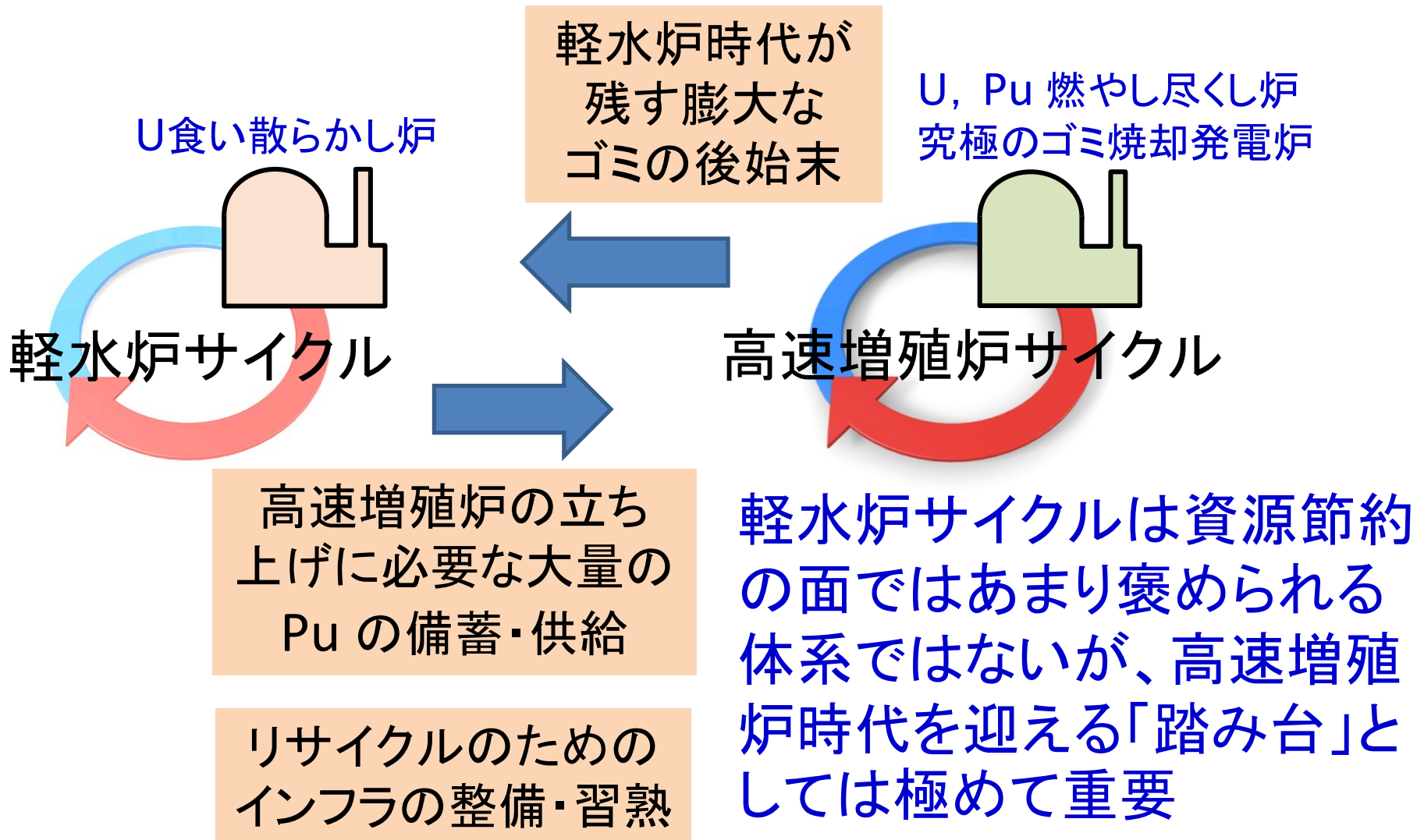
高速増殖炉サイクルの新しい視点：

「究極のゴミ焼却発電」

- 高速増殖炉サイクルは軽水炉では燃えないU238や高次化Puを燃やし尽くす発電システム
- 軽水炉(ウラン利用効率<1%)が残す膨大な量の残留物を燃料として、数千年の発電を可能とする
(新たなウラン原料確保は不要)



軽水炉サイクルと高速増殖炉 サイクルの相互補完性



立ちはだかる難題にどう取り組むか？(1)

- 政策レベルの課題

- 原子力そのものへの国民の信頼と期待の喪失
 - ⇒ 福島第一事故のトラウマをどう解消していくか？
 - ⇒ 必要性和安全性を訴える地道な努力＋国民の覚醒を促す外部要因??
- 国レベルで原子力の長期ビジョンを描く場の喪失(＝原子力委員会の実質死滅)
 - ⇒ まずは原産協会＋原子力学会で「民間原子力委員会」はどうか？
- 方向性とパッション不在の政府「戦略ロードマップ」
 - ⇒ 開発放棄はしていないというアリバイ文書？
 - ⇔ 学会新型炉部会の「技術戦略」(2019/7)の主張を今後どこまで反映できるか？

立ちはだかる難題にどう取り組むか？(2)

• 技術レベルの課題

- もんじゅ廃炉による現場体験の機会と場の喪失
 - ⇒ 発電炉体験の場を失ったのは致命的
 - ⇒ 「常陽」はどこまで役に立つか？ いつまでもつのか？ 説得性のある利用計画は？
- サイクル技術関連の人材散逸とインフラの衰退
(サイクル側の開発も並行して進めることが肝要)
 - ⇒ 最低防御ラインの確保戦略はあるか？
 - ⇒ RETFで培った技術継承策は？
- 戦略ロードマップの「ステップ1」=河原の石拾い？
 - ⇒ Don't send your people for rock hunting!
 - ⇔ 学会「技術戦略」のSSDR構想実現への作戦は？

立ちはだかる難題にどう取り組むか？(3)

• 海外との協力というツツカイ棒

- 技術面でGive & Takeの関係が構築できなければ、金を払うだけで、得るものは少ない
- フランスASTRID計画消滅のインパクトは？ 西側世界のけん引役の退場？
- 米国VTR計画はどこまで本物になるか？
- 露・印・中との協力はありうるか？ 実施意味があるか？
- ロシアは、今や最も意欲的かつ堅実なフロントランナー

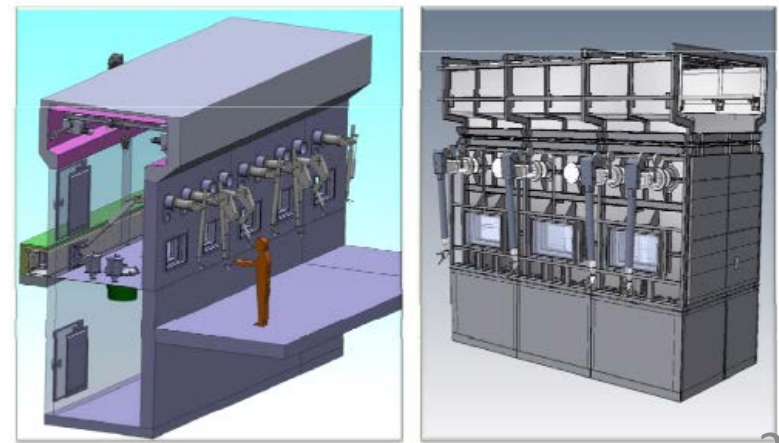
- 「ロスアトムにとって一番の優先事項の一つは、高速中性子炉を基本としたクローズド燃料サイクルの開発」(2017年12月29日、ロスアトム発表記事より)

着実に前進するロシアの 高速増殖炉サイクル計画(1)

- BN800、2016年11月に営業運転開始
- BN1200設計中、2020年にレビューし建設判断
- SVBR-100建設中、BREST設計中
- クラスノヤルスクMCCにMOX燃料工場建設、2014年にBN800燃料試験生産開始、2018年から本格製造
 - MCCの地下トンネルに建設
 - 目標製造能力: 60トン/年



Hot cells for MOX fuel fabrication at MCC



着実に前進するロシアの 高速増殖炉サイクル計画(2)

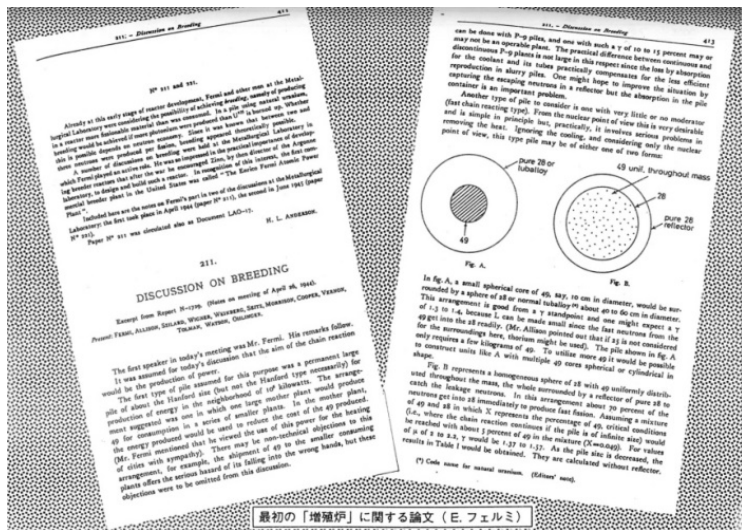
再処理

- **マヤクRT-1の設備改造・増強**
 - 処理能力400t/y回復
 - VVER-400, VVER-1000, 高速炉, 研究炉の全ての燃料に対応 … VVER-1000燃料処理2017年開始
- **クラスノヤルスク鉍業化学コンビナート(MCC)**
 - **パイロット実証施設PDC建設**
 - 先進再処理技術の実証
 - 2019年操業開始
 - **大型再処理工場RT-2**
 - VVER-1000燃料用として一旦着工したがその後中断
 - 上記PDCの成果を反映し、VVER-1000及びFBR向け再処理工場としての建設に計画修正



In retrospect

そもそも高速増殖炉は、ウランが希少資源とみなされていた時代に、ウランから最大限有効にエネルギーを取り出す方法としてフェルミらが考案

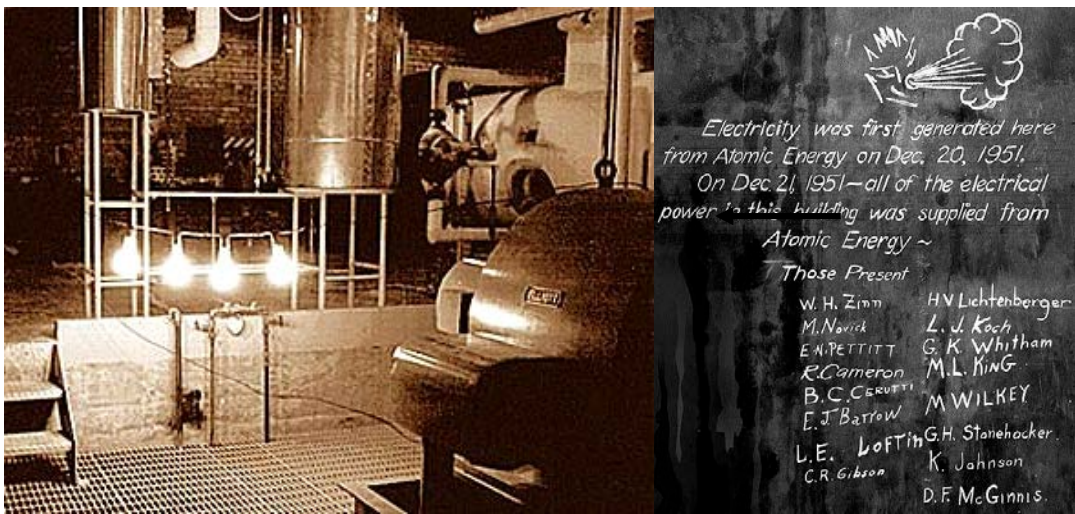


最初の「増殖炉」に関する論文 (E.フェルミ)

高速増殖炉の
基本概念を示した
1944年4月の
フェルミ論文



エンリコ・フェルミとウォルター・ジン



人類最初の原子力発電
は高速炉

1951年12月20日、アイダホ
の EBR-I が初めて発電、4個
の電灯を灯す

Electricity was first generated here
from Atomic Energy on Dec. 20, 1951.
On Dec 21, 1951—all of the electrical
power in this building was supplied from
Atomic Energy ~

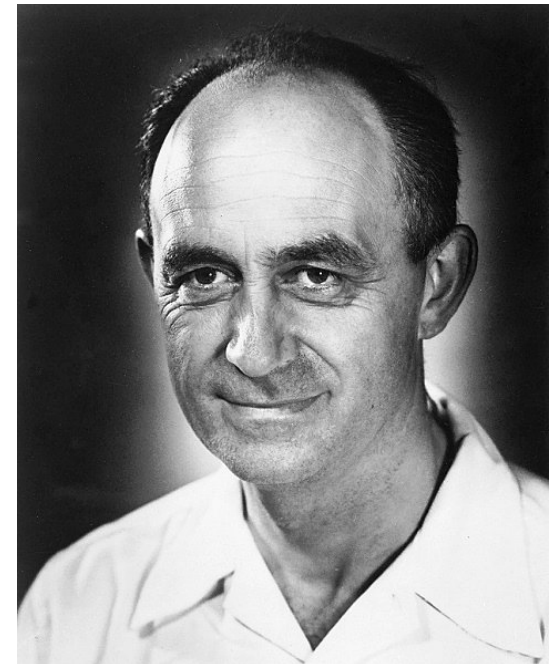
Those Present

W. H. Zinn	H. V. Lichtenberger
M. Novick	L. J. Koch
E. N. PITTITT	G. K. Whitham
R. Cameron	M. L. King
B. C. CERUETT	M. WILKEY
E. J. Barlow	
L. E. Loftis	G. H. Stenehacker
C. R. Gibson	K. Johnson
	D. F. McGinnis

エンリコ・フェルミの警告

(1944年 シカゴの新型パイル委員会)

これほど多量の放射能を
生み出し、しかもその燃料
が原爆に転用可能なエネ
ルギー源を大衆が受け入
れるかどうかは、よくわか
らない



エンリコ・フェルミ
(イタリア)

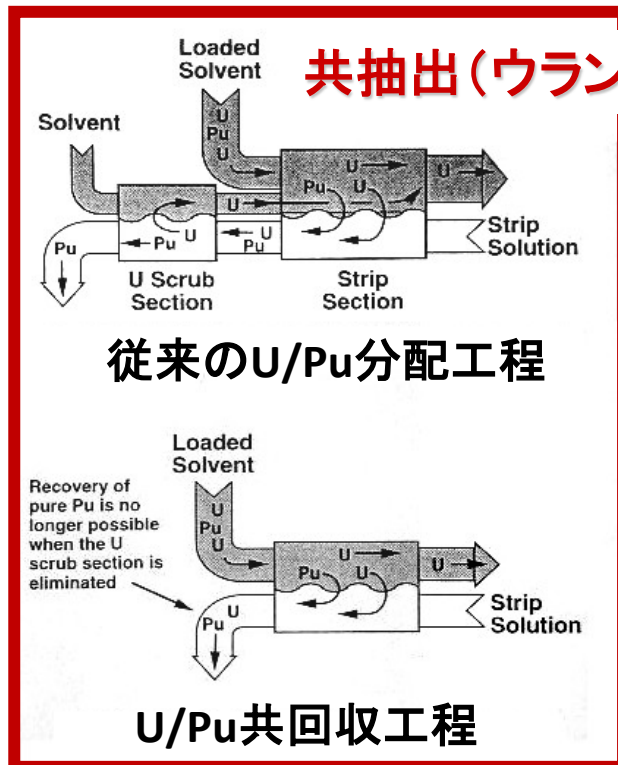
1938年ノーベル物理学賞

おわり

ご清聴ありがとうございました

FBR燃料再処理における核拡散抵抗性強化

- 炉心・ブランケット混合溶解 ⇒ 高品位Pu生産回避
- Pu・U混合抽出 ⇒ 全工程でPuの単体での存在回避
- 共抽出プロダクト液のIAEAによる遠隔リアルタイムモニタリング ⇒ Puが単体分離されていないことの確認



共抽出プロダクト液のIAEAによるリアルタイムモニタリング

