

放射性廃棄物の減容化・有害度低減 のための核燃料サイクル戦略

平成29年3月28日

日本原子力研究開発機構
高速炉研究開発部門
次世代高速炉サイクル研究開発センター
小野 清

評価の目的

2030年の原子力比率20～22%の想定の下、「2030年までに30GWeまで減少し、その後一定」のケースを対象に、天然ウランの需要量、使用済燃料の貯蔵量、廃棄物の発生量や処分量等の核燃料サイクル諸量を試算する。

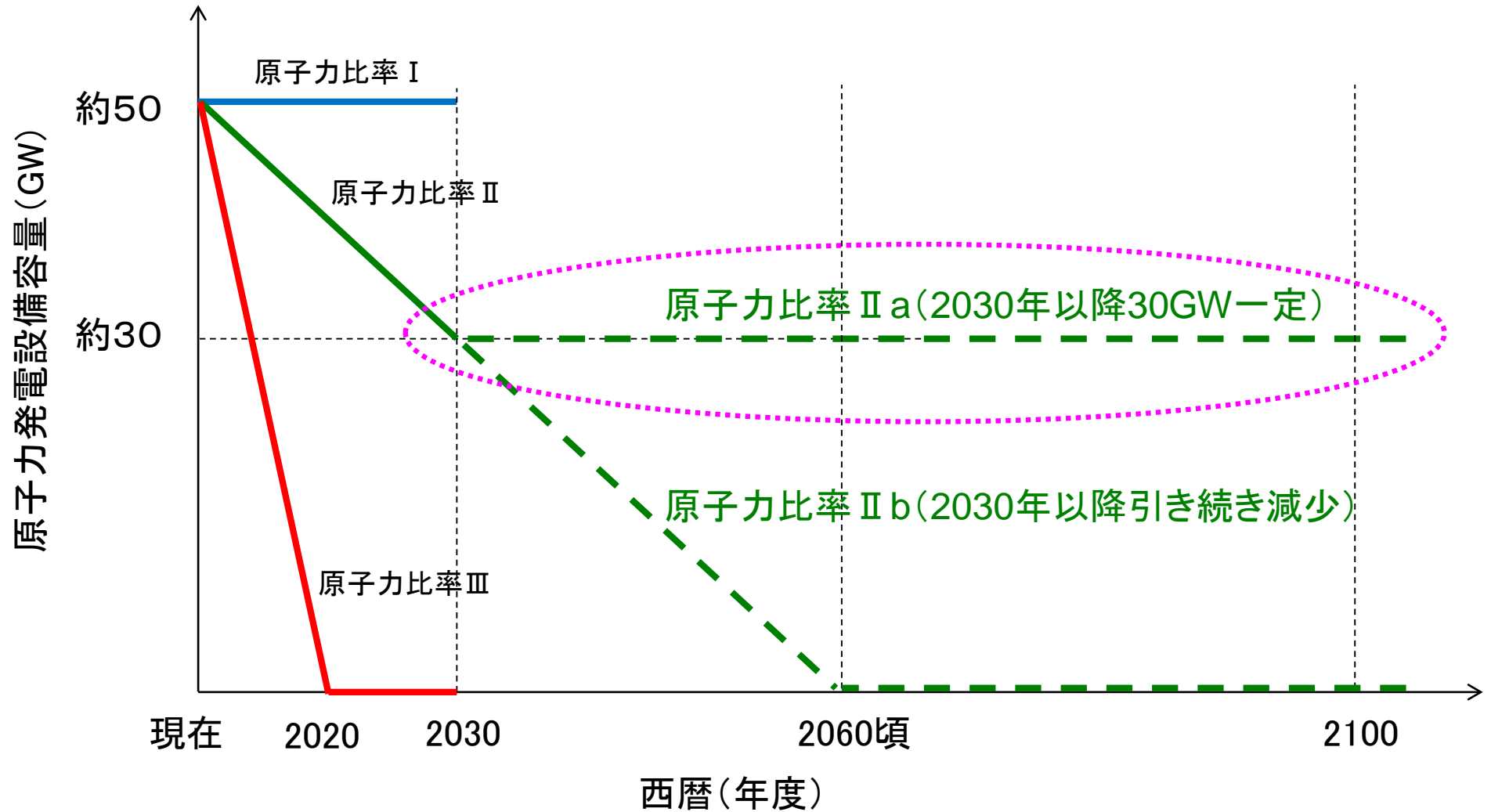
【対象としたシナリオ】

- ①全量再処理（高速炉導入）
- ②全量再処理（プルサーマル導入）
- ③全量直接処分

【対象とした期間】

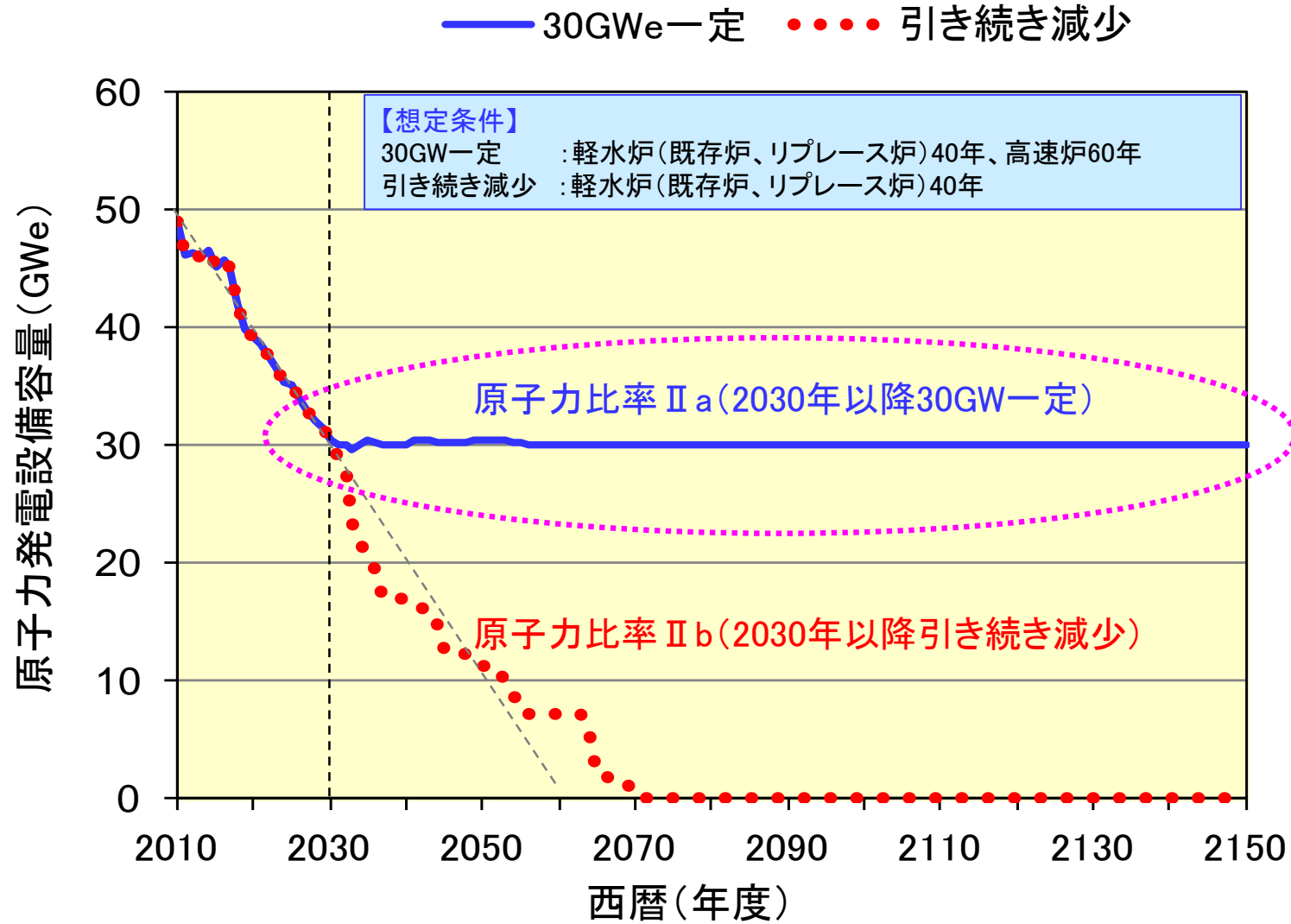
軽水炉から高速炉への移行の影響が現れる2150年頃までを対象とする。

原子力発電設備容量の設定(1/2)



原子力発電設備容量の設定の考え方

原子力発電設備容量の設定(2/2)



想定した原子力発電設備容量

解析ケース

シナリオ	① 全量再処理 (高速炉導入)	② 全量再処理 (プルサーマル導入)	③ 全量直接処分
原子力比率Ⅱ			
Ⅱ a 2030年以降 30GWe一定	Ⅱ a-①	Ⅱ a-②	Ⅱ a-③
Ⅱ b 2030年以降 引き続き減少	Ⅱ b-①	Ⅱ b-②	Ⅱ b-③

【シナリオの概要】

①全量再処理(高速炉導入)

全ての使用済燃料を再処理する。2050年以降、軽水炉のリプレースにより高速炉を導入する。

②全量再処理(プルサーマル導入)

全ての使用済燃料を再処理する。プルサーマルを引き続き導入する。使用済プルサーマル燃料は直接処分する。

③全量直接処分

全ての使用済燃料を直接処分する。

シナリオ評価における評価項目について

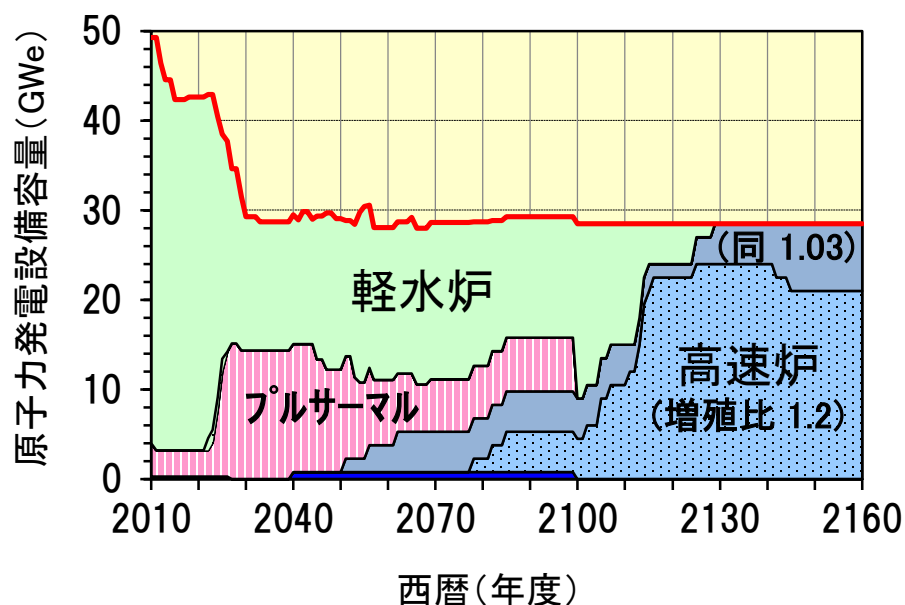
- エネルギー安全保障、ウラン供給確保
 - 天然ウラン需要量
⇒再処理施設や高速炉の導入による天然ウラン需要量への影響を示す。
- 使用済燃料管理・貯蔵、放射性廃棄物
 - 使用済燃料貯蔵量
 - 処分場面積
⇒再処理施設や高速炉の導入による使用済燃料貯蔵量、放射性廃棄物処分場面積への影響を示す。
- 核燃料サイクルを巡る国際的視点
 - プルトニウム、マイナーアクチニド貯蔵量

原子力比率Ⅱ a(2030年以降30GWe一定)の結果

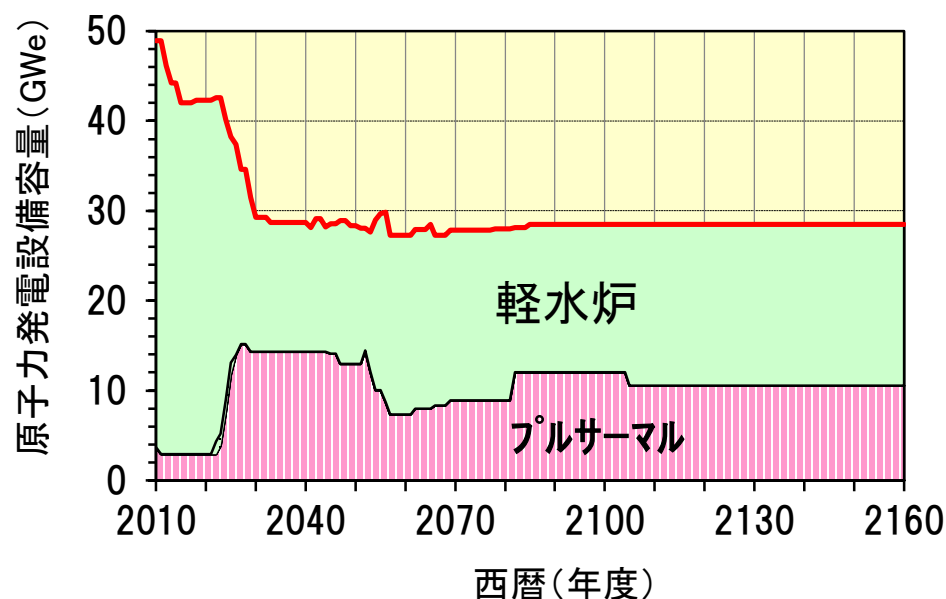
- ①全量再処理(高速炉導入)
- ②全量再処理(プルサーマル導入)
- ③全量直接処分

「30GWe一定」の解析結果(発電設備構成1/2)

- 「全量再処理/FBR導入」では、FBRの実用化以前はPuバランスに応じて**最大15GWe程度のプルサーマルを導入し**、海外および六ヶ所再処理から回収したPuを利用する。
- 2050年のFBRの実用化以降も、引き続き6~10GWeのプルサーマルを50年程度導入し、軽水炉再処理およびFBR再処理から回収したPuを利用する。2130年頃に全ての軽水炉がFBRに置き換わる。
- 「全量再処理/プルサーマル導入」では、最大15GW程度のプルサーマルを導入し、海外および六ヶ所再処理から回収したPuを利用する。



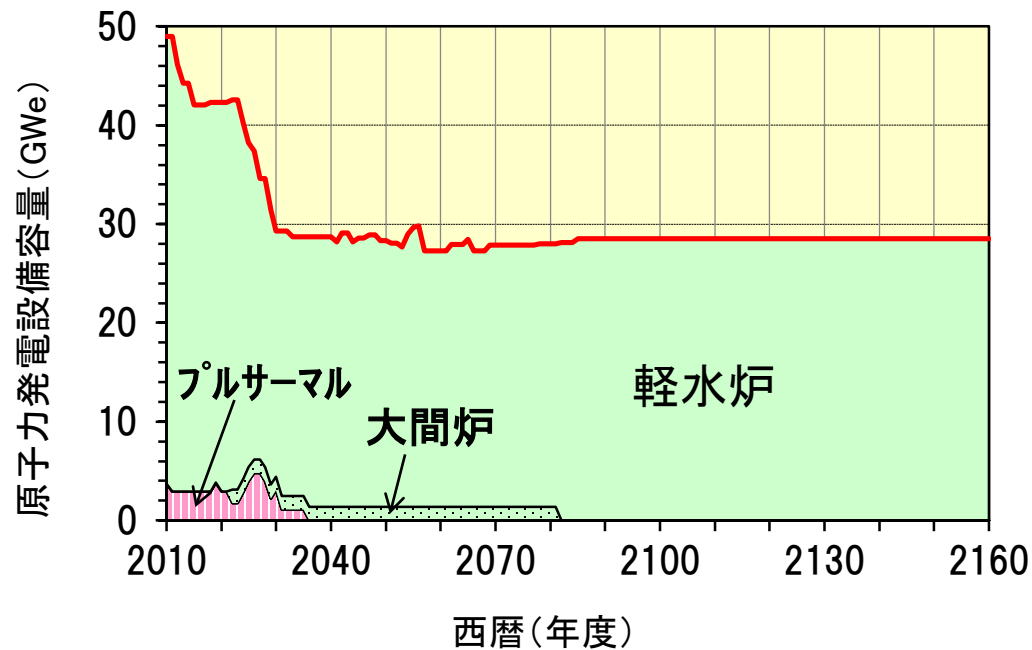
原子力発電設備容量(全量再処理/FBR導入)



原子力発電設備容量(全量再処理/プルサーマル導入)

「30GWe一定」の解析結果(発電設備構成2/2)

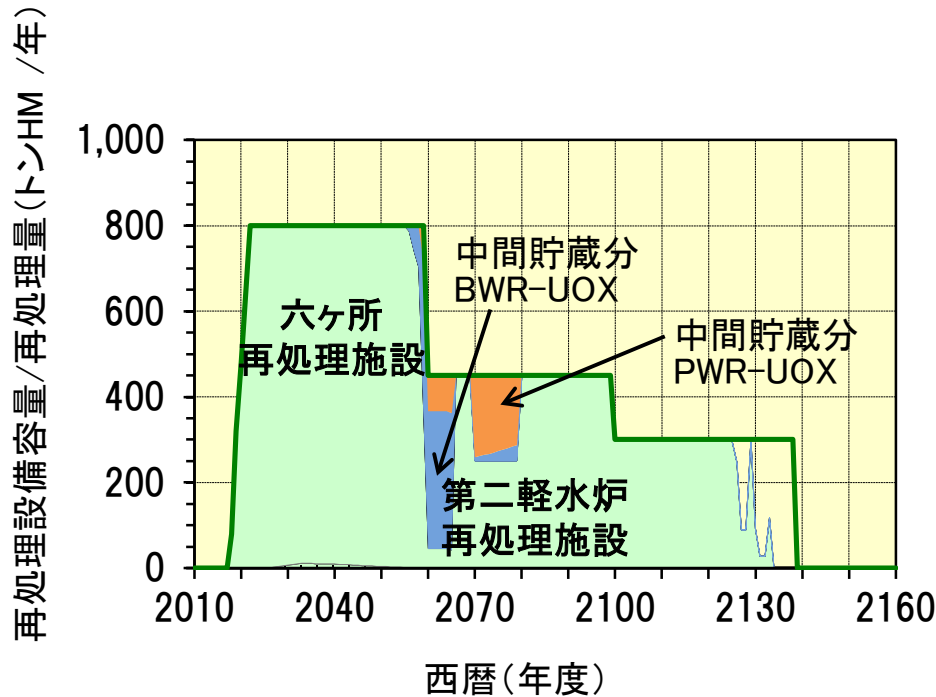
- 「全量直接処分」では、最大5GW程度のプルサーマルを今後20年程度導入し、海外から回収したPuを利用する。



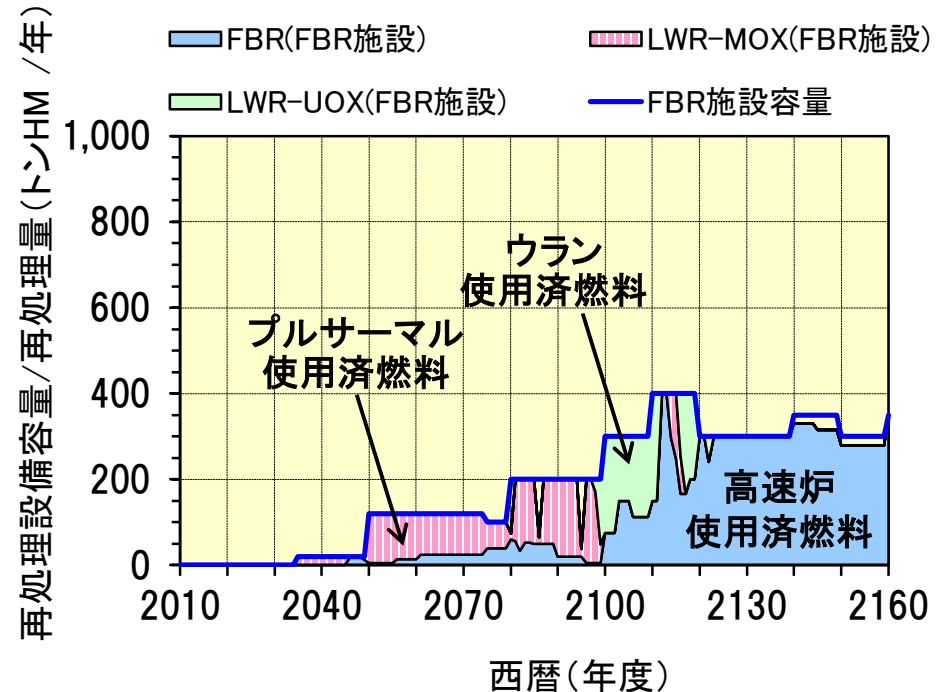
原子力発電設備容量(全量直接処分)

「30GWe一定」の解析結果(再処理計画)

- 六ヶ所再処理施設に続いて、第二軽水炉再処理施設(450tHM/年)を導入する。
- FBR再処理施設は、2050年から本格導入し、当初の50年間はプルサーマル使用済燃料を中心に再処理を行う。最大で400tHM/年程度の容量が必要となる。



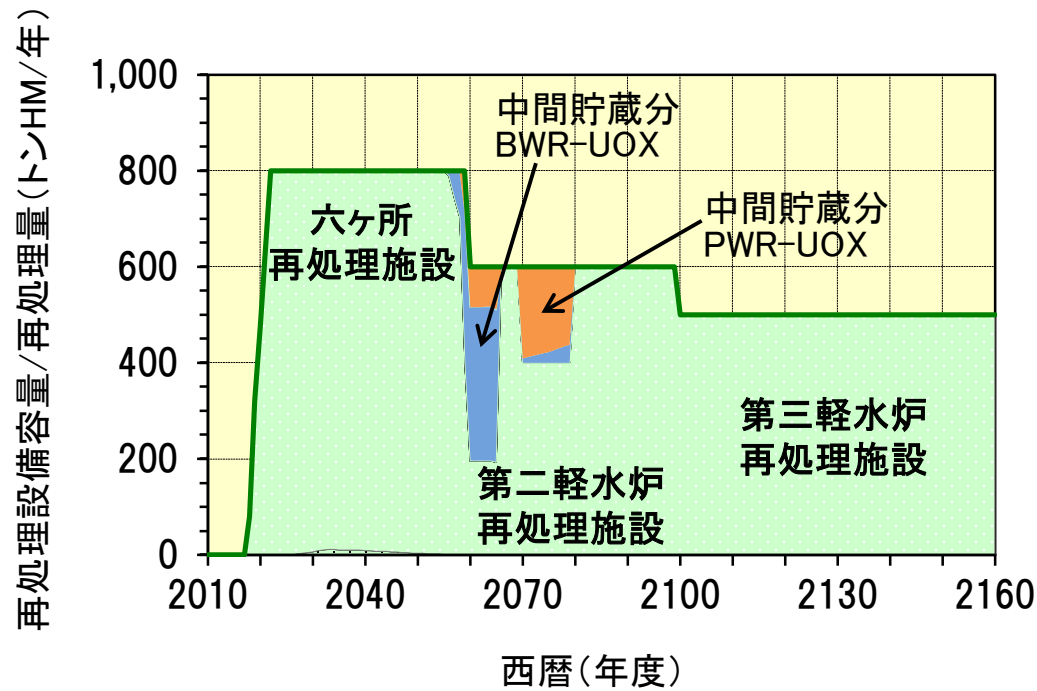
LWR再処理計画(全量再処理/FBR導入)



FBR再処理計画(全量再処理/FBR導入)

「30GWe一定」の解析結果(再処理計画)

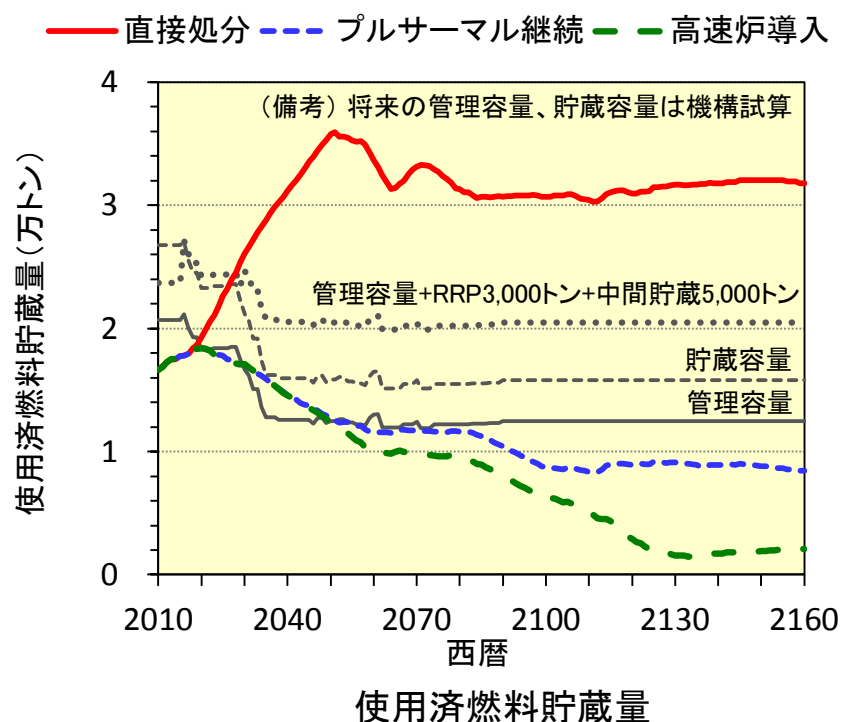
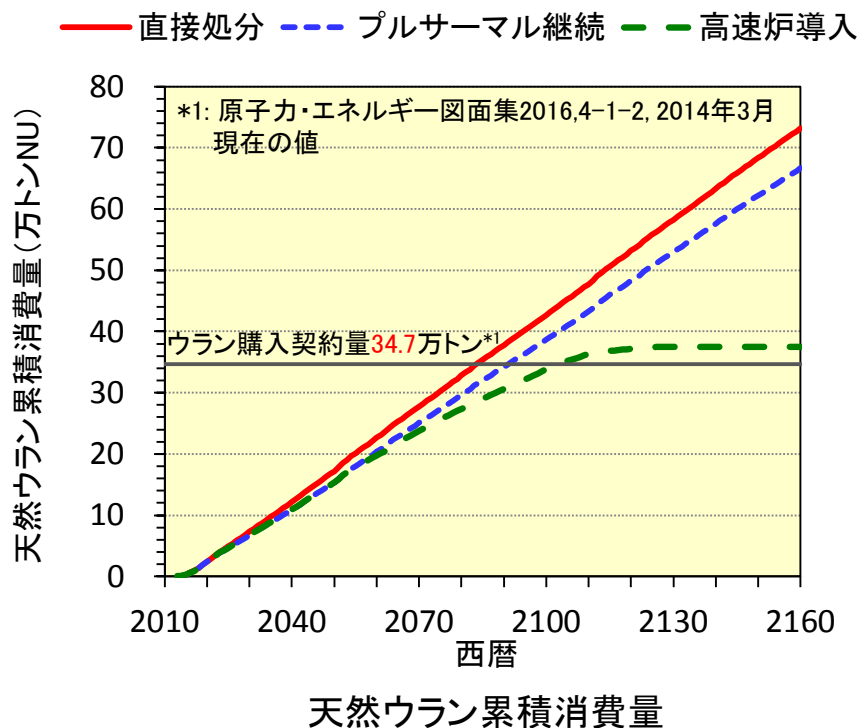
- 六ヶ所再処理施設に続いて、第二軽水炉再処理施設(600tHM/年)を導入する。
- プルサーマル使用済燃料は再処理せずに、直接処分する。



LWR再処理計画(全量再処理/プルサーマル導入)

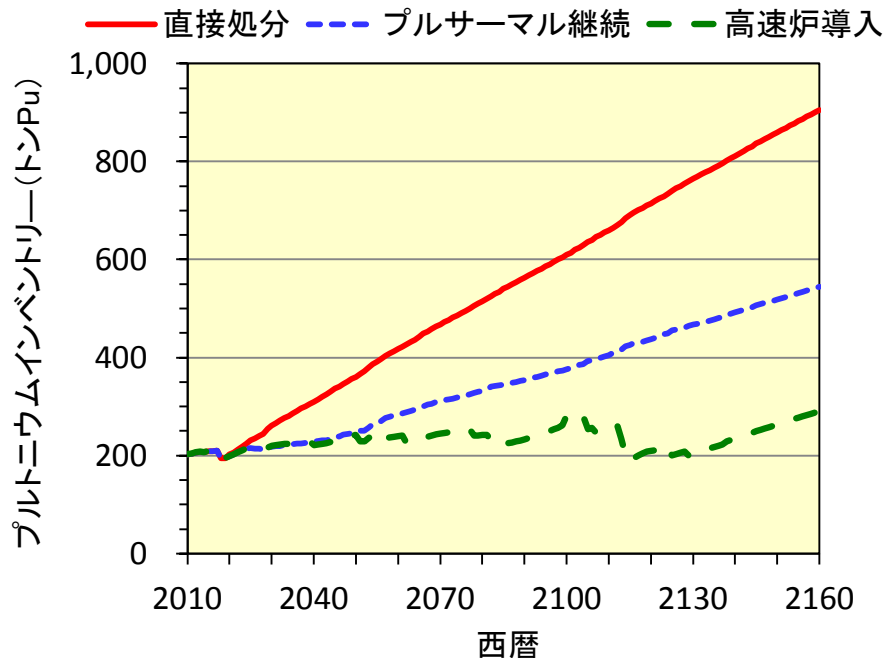
「30GWe一定」の評価結果(天然U消費量とSF貯蔵量)

- **軽水炉利用体系の場合**、天然ウラン累積消費量は今世紀終盤までに日本のウラン購入契約量約35万トンを超えるため、**天然ウランの追加の購入契約が必要**となる。
- 一方、**高速炉サイクルへの移行により**、天然ウラン累積消費量は、**国内ウラン購入契約量程度に抑制**され、持続可能な原子力利用、エネルギー自給率向上が期待される。
- **直接処分では**、地上施設で冷却・保管される使用済燃料が2050年頃に最大3.6万トン程度に達するため、さらに**1.6万トン程度の追加の貯蔵施設が必要**となる。
- **プルサーマル継続の使用済燃料貯蔵量は**、直接処分される使用済MOX燃料を地上施設で冷却・保管するため**最終的に1万トン程度で推移**する一方、**高速炉導入では0.2万トン程度まで大幅に減少**する。

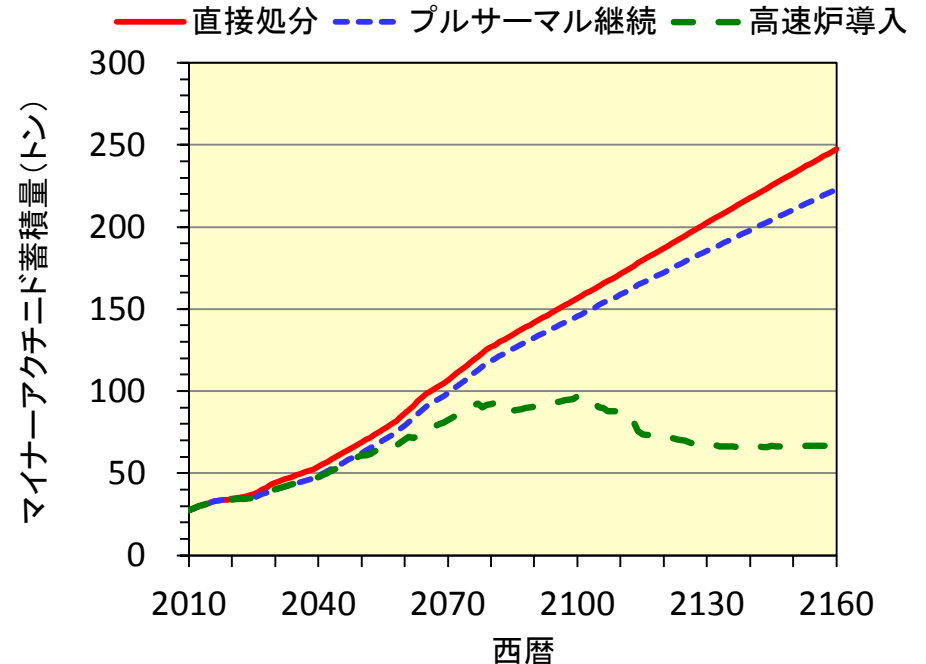


「30GWe一定」の評価結果(PuとMAのインベントリー)

- **高速炉サイクルを導入した場合**、地上施設で冷却・保管されている使用済燃料とガラス固化体、さらに地層処分されたガラス固化体に含まれるプルトニウム量(**プルトニウムインベントリー**)を**大幅に抑制**できる。
- 炉外のマイナーアクチノイド量(**マイナーアクチノイドインベントリー**)は、**直接処分とプルサーマル継続では連続的に増加**する。第二再処理工場や高速炉再処理工場回収したMAを高速炉燃料としてリサイクルする**高速炉導入の場合、その量を大幅に抑制**できる。その殆んどは海外再処理工場と六ヶ所再処理工場で製造されたガラス固化体中に含まれている。



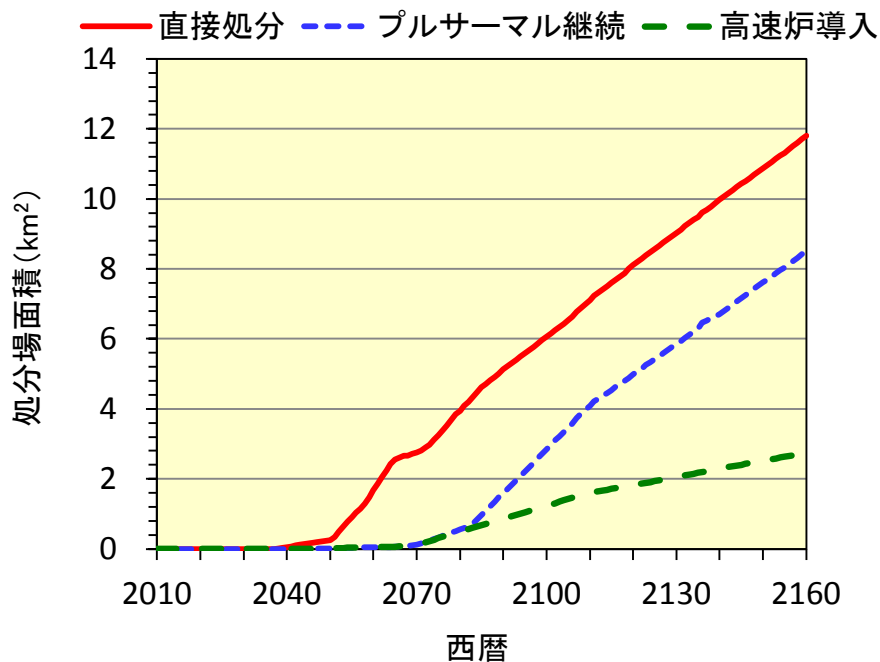
炉外のプルトニウムインベントリー



炉外のマイナーアクチノイド蓄積量

「30GWe一定」の評価結果(HLWの処分場面積)

- 軽水炉サイクルから高速炉サイクルへ移行した場合、処分場面積は、直接処分(主にUOX燃料が地層処分対象)、およびプルサーマル継続(ガラス固化体とMOX燃料が地層処分対象)の1/4~1/3で済むため、最終処分場の効率的な利用が大きく図られる。



ガラス固化体及び使用済燃料の処分場面積

「30GWe一定」の解析のまとめ(1/2)

【エネルギー安全保障、ウラン供給確保(天然ウラン需要量)】

- 軽水炉利用体系の場合、今世紀終盤には天然ウランの追加の購入が必要である。
- 高速炉の導入により、2130年頃以降ウラン資源の輸入なしに原子力発電が可能となる。

【使用済燃料管理・貯蔵】

- 「全量直接処分」では、将来、1.6万トンの貯蔵容量の増強が必要となる。
- 一方、「全量再処理(高速炉導入、プルサーマル導入)」では、貯蔵容量の増強の必要はなく、高速炉導入では最終的に0.2万トン程度で推移する。

「30GWe一定」の解析のまとめ(2/2)

【核燃料サイクルを巡る国際的視点(プルトニウム貯蔵量等)】

- 「全量再処理(高速炉導入、プルサーマル導入)」では、Puバランスを取りながら高速炉やプルサーマルを導入することが可能である。
- また、使用済燃料中のPuをリサイクル利用することで、核燃料サイクル全体のPuインベントリーの増加を低く抑えられる。特に、高速炉導入のシナリオでは大幅に抑制できる。
- MAインベントリーについても、高速炉導入シナリオでは大幅に低減される。

【放射性廃棄物】

- 地層処分する高レベル廃棄物の処分場面積については「全量再処理(高速炉導入)」が最も小さく、「全量直接処分」や「全量再処理(プルサーマル導入)」に比べて1/4~1/3以下となる。

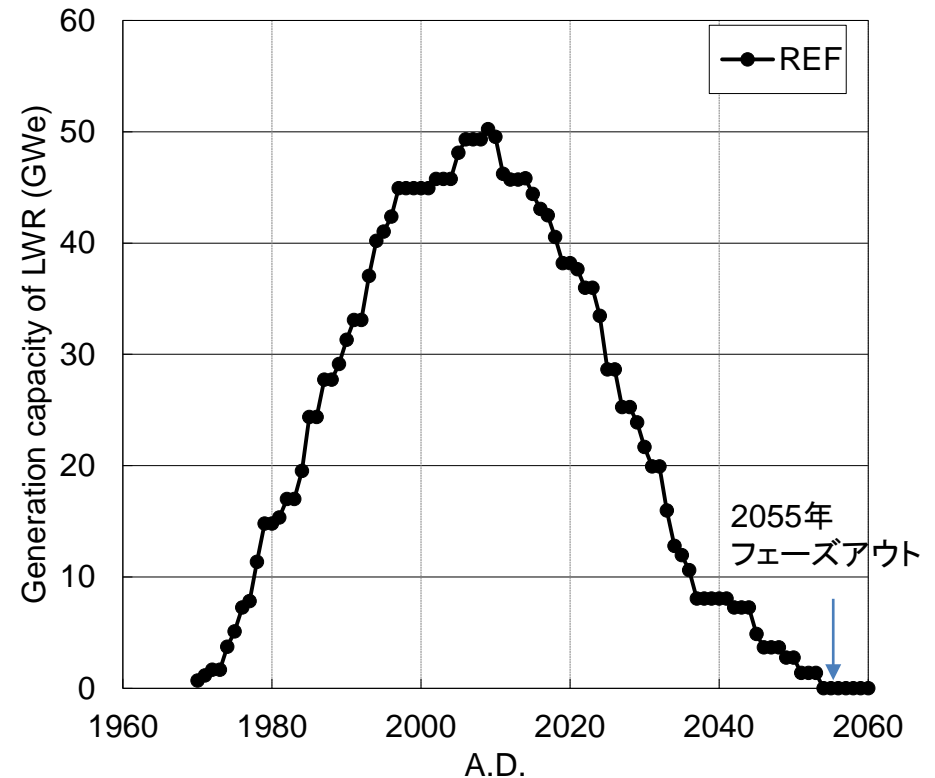
プルトニウムとマイナーアクチニドの 核変換シナリオ (FR、ADS、MSFR) の比較

【参考文献】

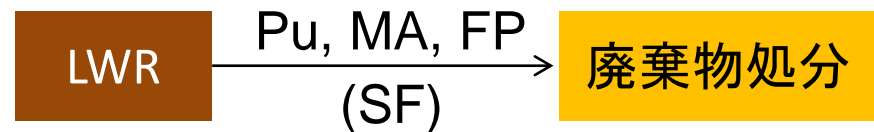
K. NISHIHARA, T. IWAMURA, H. AKIE, Y. NAKANO, W. V. ROOIJEN, Y. SHIMAZU, "Comparative Study of Plutonium and Minor Actinide Transmutation Scenario", Proceedings of 21st International Conference & Exhibition; Nuclear Fuel Cycle for a Low-Carbon Future (GLOBAL 2015), p.388 - 395, 2015/09

背景：原子力フェーズアウトシナリオ

- 福島第一の事故後、日本ではFBRによるPu利用が不透明になっている
- もし、現在のLWRがリプレースされず、FBRの導入がない場合、LWRの使用済燃料中にPuが遺産として残存する
- 本研究では、このLWR使用済燃料中のPuとマイナーアクチニド(MA)の核変換に焦点を当てる

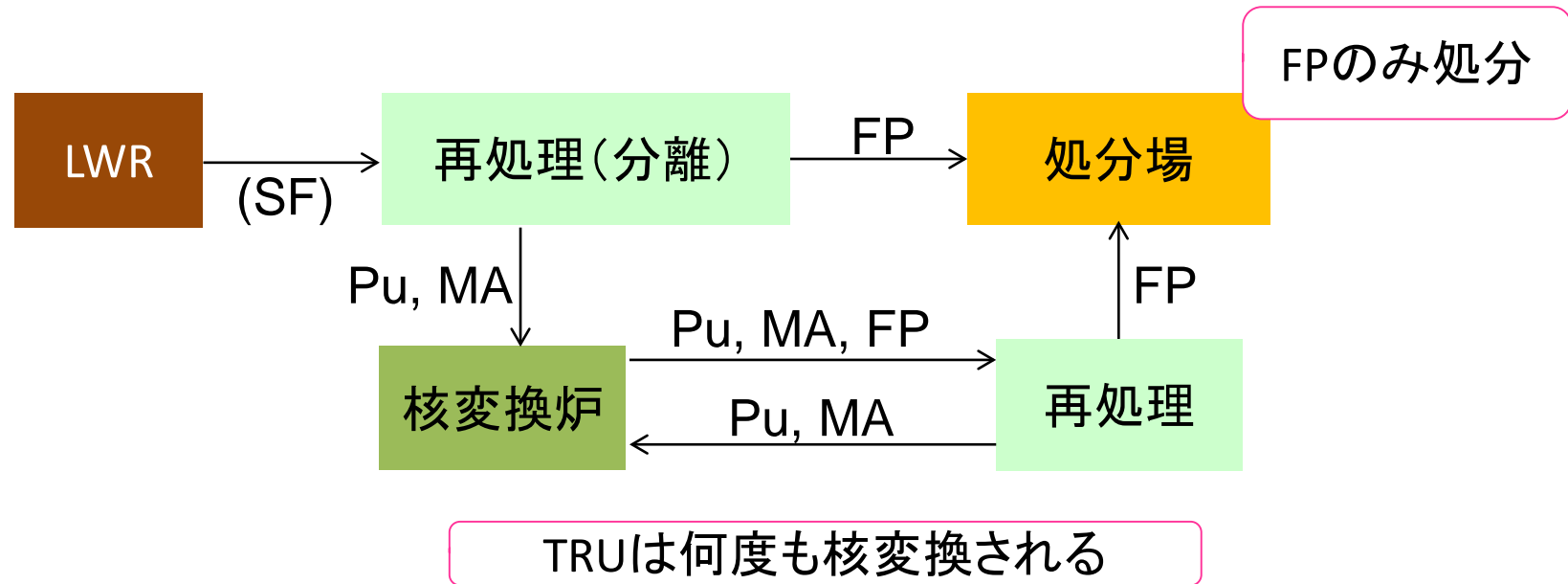


基準シナリオ (REF)



LWR使用済燃料の直接処分

多重核変換サイクル



核変換炉として高速中性子炉を想定

- ・FR: Na冷却型高速炉
- ・ADS: 加速器駆動未臨界高速炉
- ・MSFR: 熔融塩高速炉

目的と評価項目

- ✓ 数多くの核変換技術が、色々な研究グループより提案されている。
- ✓ 各々が、各前提条件や解析に基づいて、直接処分よりも優れていることを主張している。
- ✓ 本解析では、共通の前提条件と解析に基づいて、各核変換技術の比較評価を試みた。

1. 核変換炉の導入規模

設備容量、基数、導入スケジュール

2. PuとMAのインベントリー

時間変化、核変換炉の導入終了後の残存量

3. 廃棄物処分

処分場の面積、潜在的な有害度(毒性)

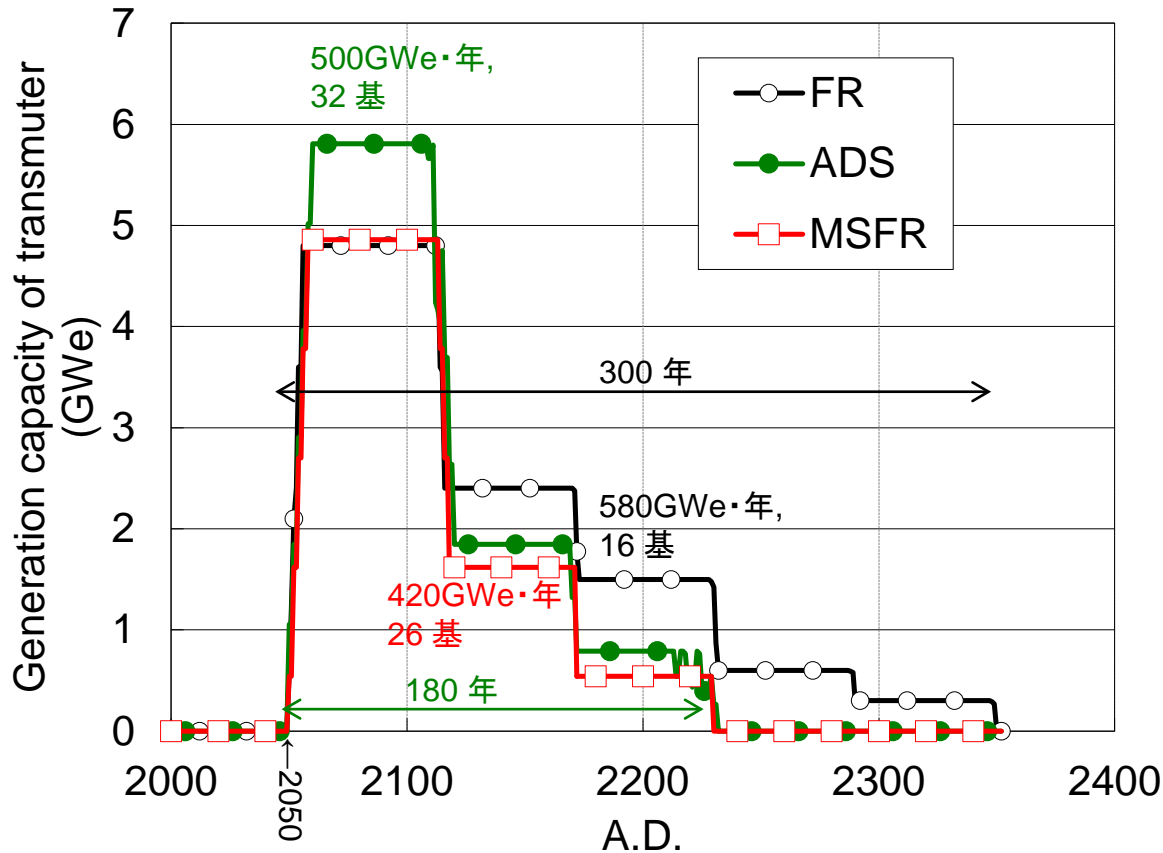
核変換炉の仕様

	単位	多重核変換サイクル		
		FR	ADS	MSFR
核変換炉		FR	ADS	MSFR
熱効率	%	37.5	33	45
稼働率	%	84	58.8	95
熱出力	GWt	1.6	0.8	0.6
電気出力	GWe	0.6	0.264	0.27
1バッチの長さ	日	183	50	NA
バッチ数		4	6	NA
プラント寿命	年	60	60	60
比出力	MW/tHM	80.4	400	92
燃焼度	GWd/tHM	59	120	NA
アクチニド核種に対するPuの割合	%	41	~90	~90
再処理までの冷却期間	年	3	3	NA
再処理時のアクチニド核種のロス率	%	0.1	0.1	0.1
導入時期	西暦	2050	2050	2050

共通の前提条件

- LWRの建設は、大間炉(フルMOX BWR)の2014年
が最後
- 六ヶ所再処理工場は2015年から徐々に運転開始
、2025年からはMA分離を想定
- 解析にはNMBコード(Nuclear Material Balance
Code)を使用

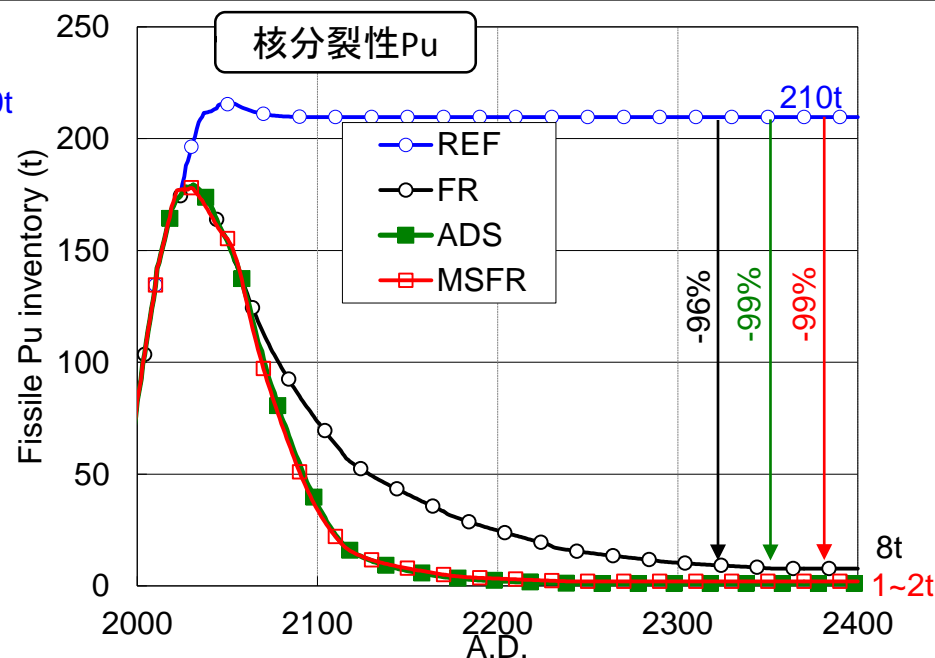
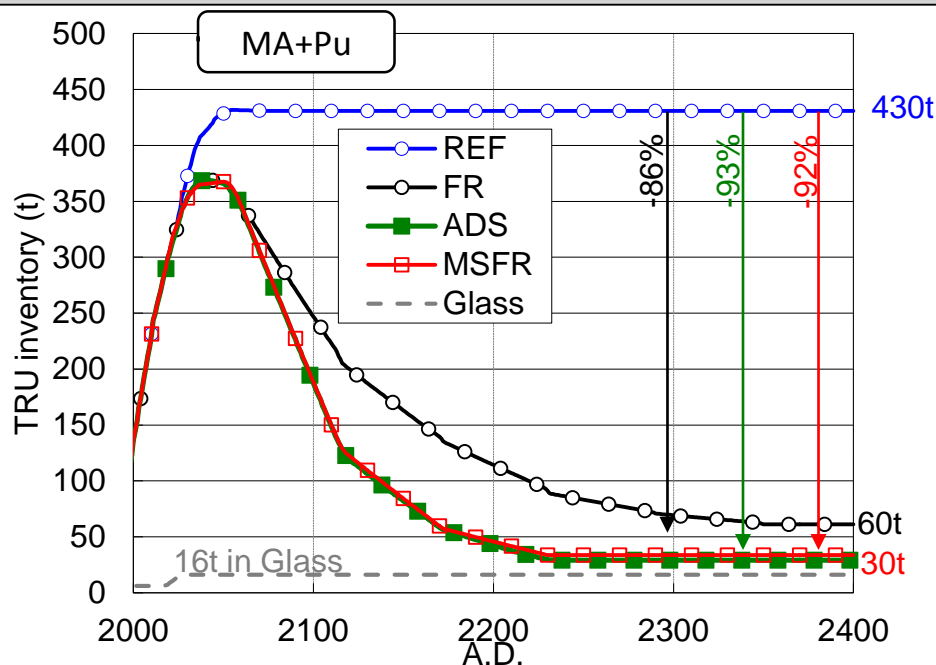
解析結果：核変換炉の導入量



- FR
 - 導入基数は3ケースの中で最も少ない16基。これは熱出力が3炉型の中で最も大きいため。
 - 一方、必要な導入期間は、核変換能力が低いため300年間となり、3ケースの中で最も長い。
- ADS
 - 導入基数は最も多い32基
 - 必要な期間は180年
- MSFR
 - ADSと同じような傾向
 - MSFRはADSに比べ、稼働率が高いため、導入量は少ない。

1. 核変換炉は2050年からTRUインベントリーに応じて導入
2. 60年間の運転後に廃炉
3. また、2110年のTRUインベントリーに応じてより少ない核変換炉を導入
4. その後も60年ごとに繰り返す。

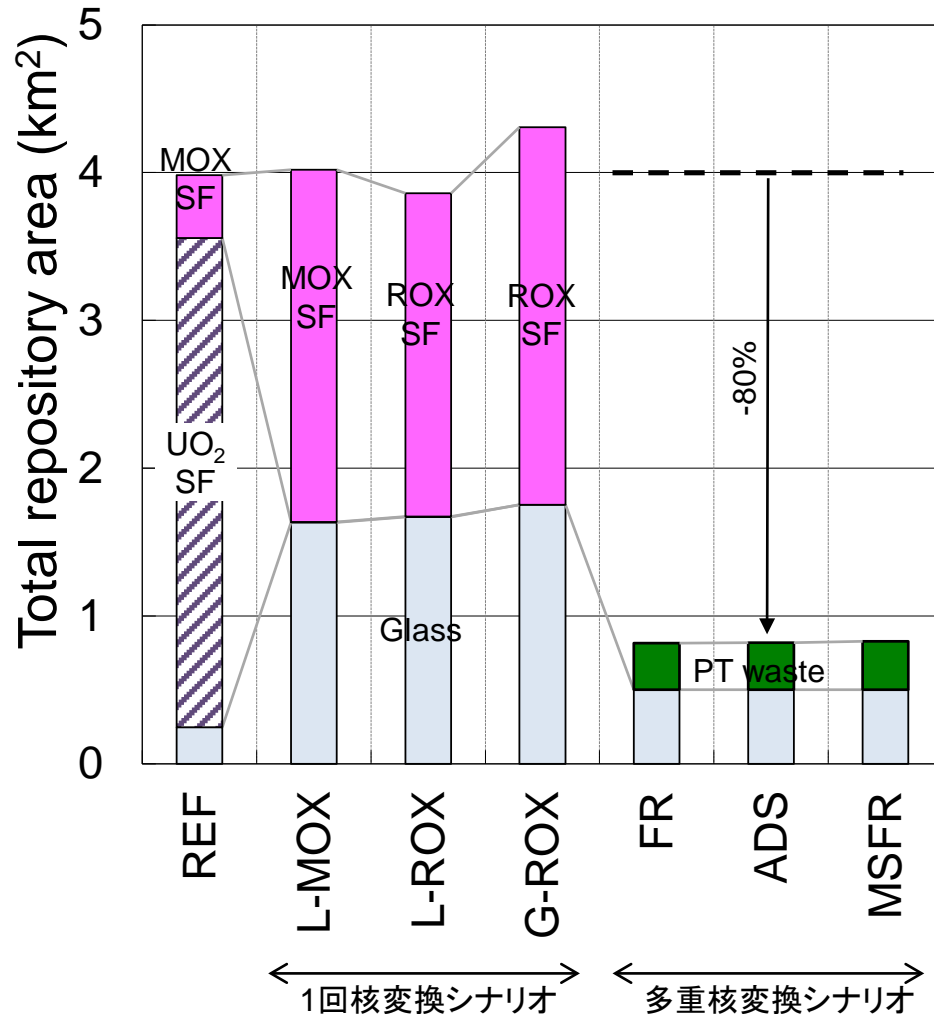
解析結果：アクチニドのインベントリー



- TRUは、2050年以降、指数関数的に減少
- FRシナリオでは、減少は緩やかで、最終的に残存するTRU量も多い
- ADSとMSFRシナリオでは、30トンのTRUが残存するが、そのうち16トンは2025年の六ヶ所再処理工場への分離技術導入以前に発生したガラス固化体の中に存在
- その他の14トンは、核変換できなかったものと少量の再処理時のロス分

- 大部分の核分裂性Puは核変換される
- 少量の核分裂性Puが核変換炉の残存燃料中に存在

解析結果：処分場の面積

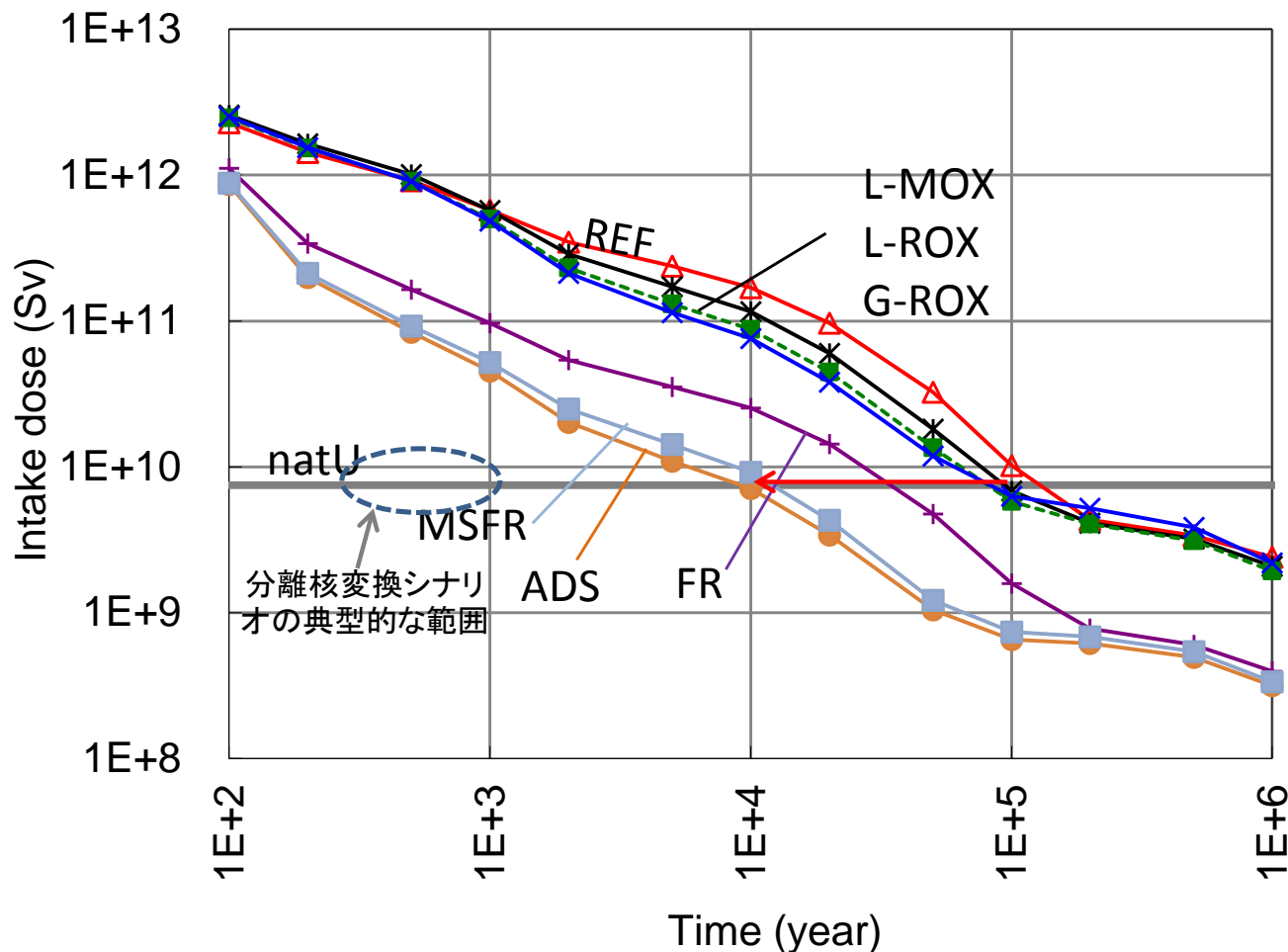


● 多重核変換シナリオ

- 直接処分シナリオ(REF)に比べて面積が80%減少
- そのうち0.5km²は、2025年の分離技術導入以前に発生したガラス固化体の処分で占める

解析結果：潜在的な放射性毒性

(直接経口摂取を想定した被ばく量)



● 多重核変換シナリオ

- ADSやMSFRシナリオでは、直接処分シナリオと比べ、天然ウランと同等の毒性になる時間が短くなり、約1万年となる
- FRシナリオでは、TRUの残存量が多いため、その短縮効果は控えめとなる
- 分離技術導入以前に発生したガラス固化体中のMAの影響により、短縮効果は悪化している(典型的な分離・核変換シナリオでは千年以下となる)

解析結果の一覧表

項目		核変換炉				インベントリー (トン)			廃棄物処分	
		GWe	GWt	基	期間 (年) ^{*1}	Pu+ MA	Pu	Puf	面積 (km ²) ^{*2}	毒性 (年) ^{*3}
直接処分 (Ref.)		-	-	-	-	431	348	210	4.0	1E+5
多重核 変換	FR	9.6	24	16	300	57	21	8	0.82	3E+4
	ADS	8.4	25.6	32	180	28	9	1	0.82	1E+4
	MSFR	7.0	15.6	26	180	34	13	2	0.83	1E+4

*1 核変換に必要な年数

*2 坑道やユーティリティ施設を除いて、廃棄物配置に必要な処分場面積

*3 等価な天然ウラン量の毒性以下になるのに必要な年数

結 論

- 概して、先進的な技術は高い核変換性能を有するが、より多くの核変換炉を必要とする。
- 各技術の長所と短所の把握においては、経済性、技術的な成熟度、固有の安全性、廃棄物処分への影響、核不拡散性などの様々な観点（特徴）を考慮する必要がある
- 共通の前提条件や解析手法を用いた今回の比較評価は、これらの観点における今後の議論のベースを提供するものである。

ご清聴 ありがとうございます！