

キャノングローバル戦略研究所
湯原哲夫

(株) イーツーエム
飯田式彦

高速炉の役割

日本の課題

-放射性廃棄物消滅処理-

世界の課題

-地球温暖化防止-

目次

海外調査のまとめ

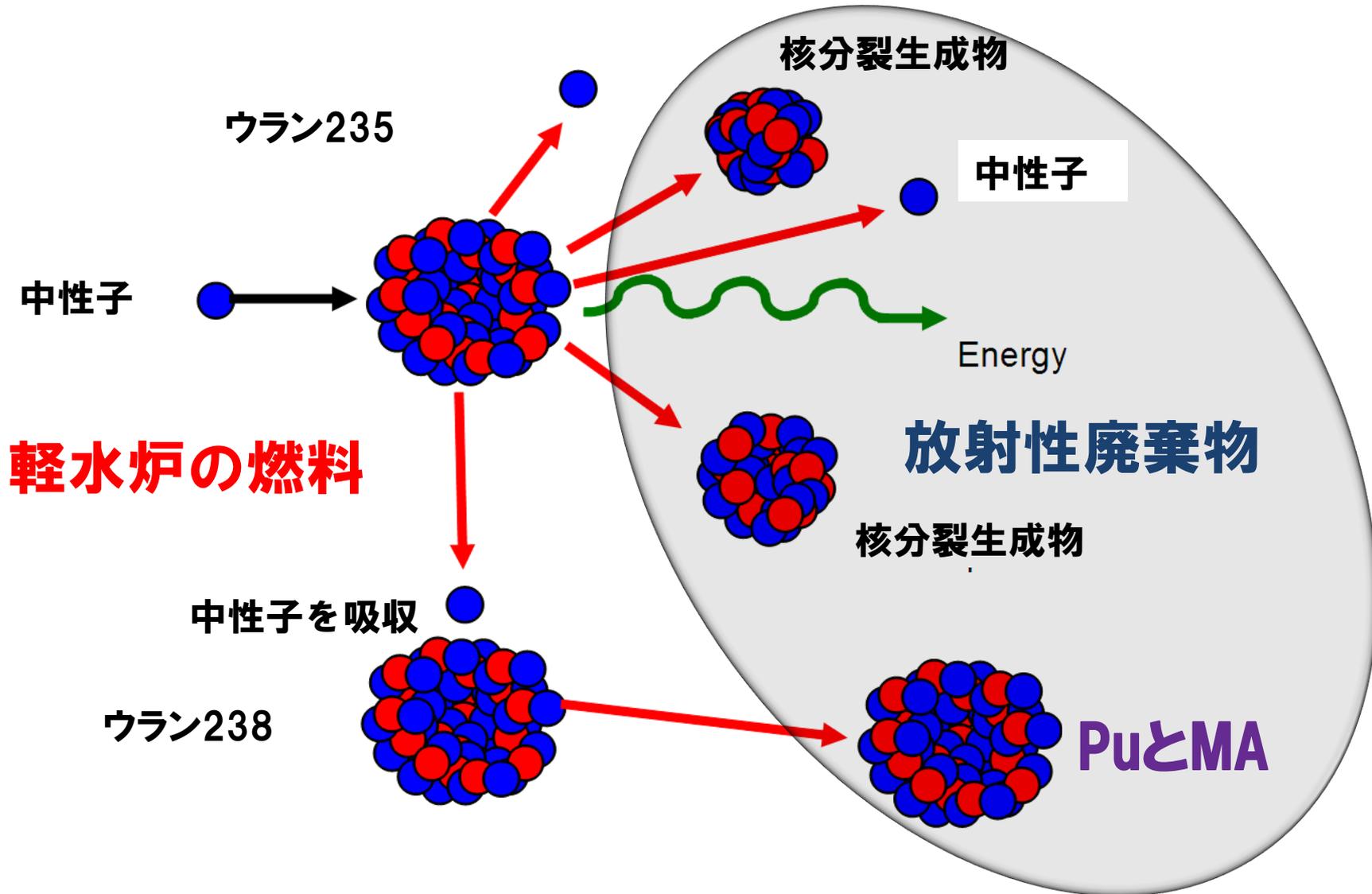
日本の課題解決のための高速炉の利用 廃棄物消滅処理と原子力発電量確保

世界の課題解決のための高速炉の利用 地球温暖化対策としての高速炉の利用

将来展望

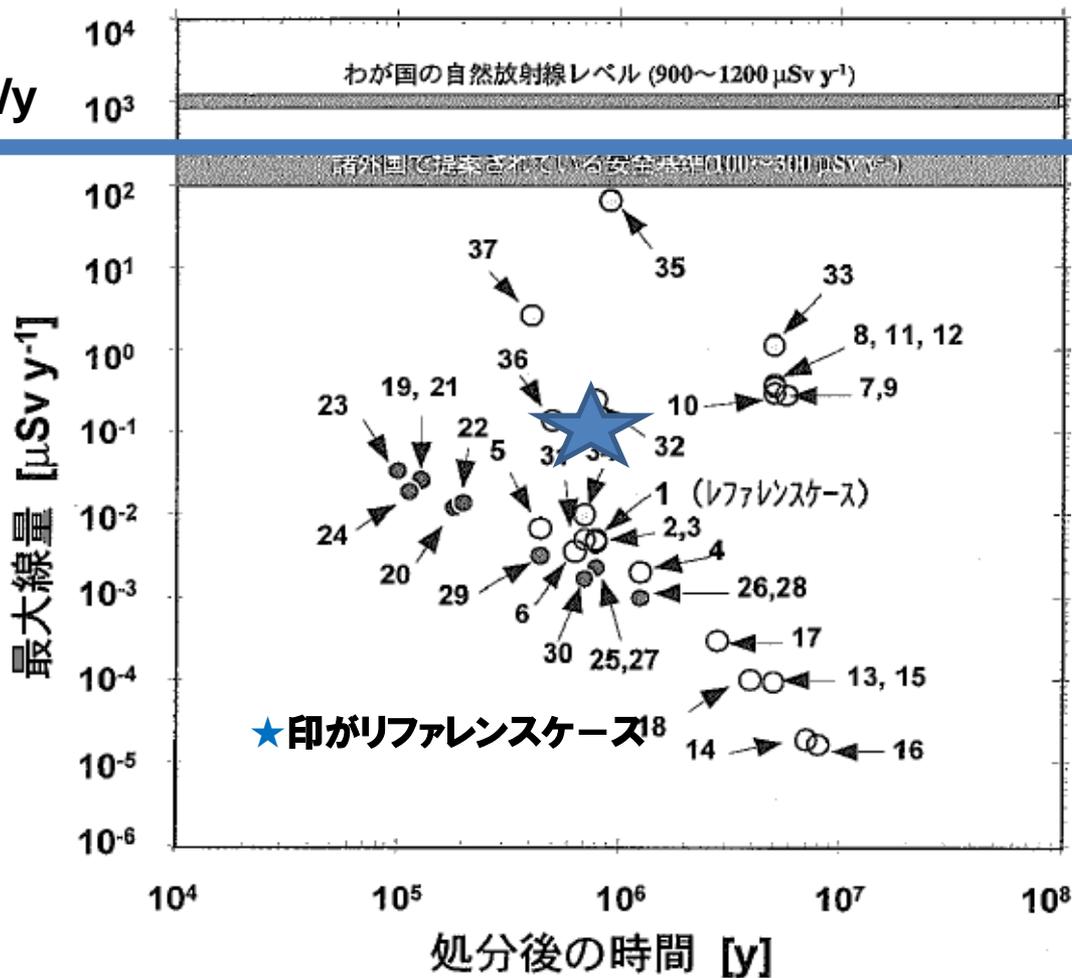
海外調査のまとめ

マイナアクチニド (MA) の起源



放射性廃棄物の地層処分の安全性

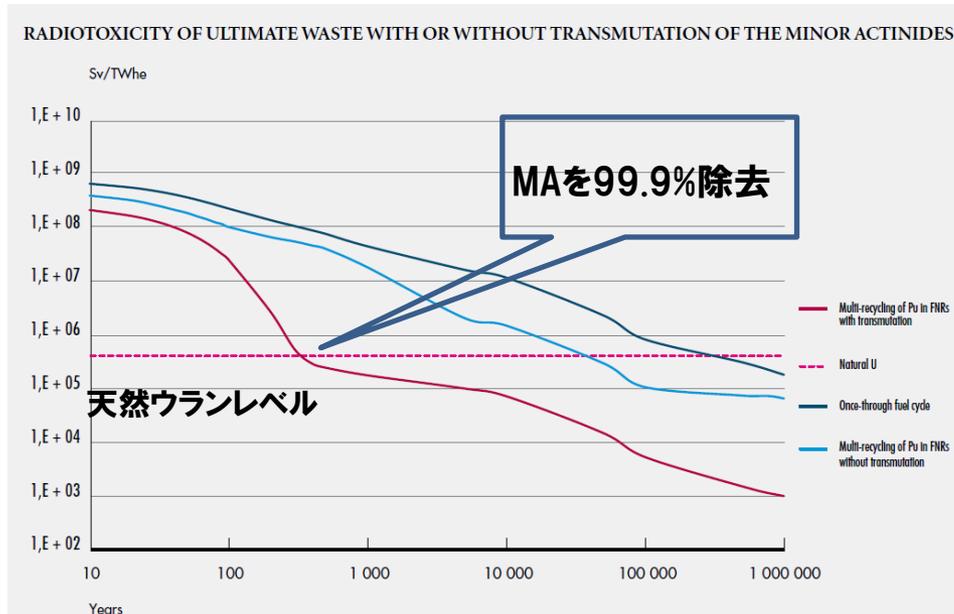
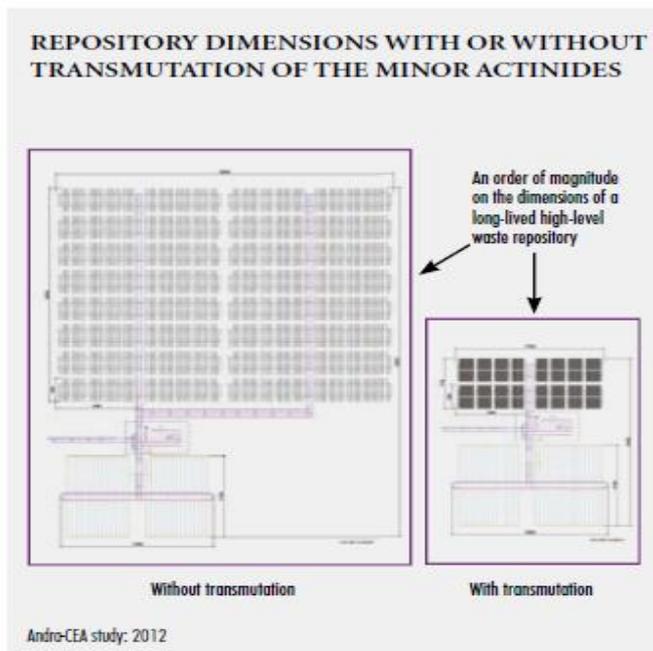
0.25mSv/y



自然放射線
から受ける
被ばく量の
1/10

核燃料サイクル機構 “我が国における高レベル放射性廃棄物 地層処分の技術的信頼性 地層
処分研究開発第2次とりまとめ” JNC TN1400-99-020, 1999

放射性廃棄物からMAを除去する効果



崩壊熱の大きいAmを除去すると高レベル廃棄物処分施設の大きさは、1/7に、すべてのマイナアクチニドを除去すると、同1/10にまで削減する

MA (Am, CmおよびNp) を99.9%除去すると、天然ウラン放射能による人体への影響レベルにまで、処分施設の放射能が低減する期間は、数百年オーダーにまで短縮される

CEA: Report on Sustainable Radioactive Waste Management(2012)

使用済み燃料の再処理施設（廃棄物の分離）

軽水炉使用済み燃料の商用再処理施設

「Wikipediaラハーグ」より

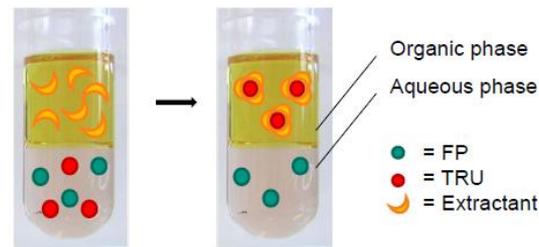


湿式法

水溶液と溶媒を接触させ
PuとMAを溶媒に抽出する

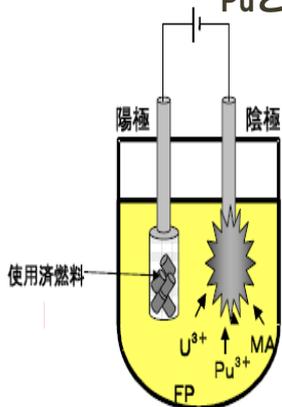
Separating TRU
(Np, Pu, Am, Cm)
from fission products

Solvent extraction:



乾式法

熔融塩を陽極として液体陰極に
PuとMAを析出させる



酸化還元反応	酸化還元電位 (V, Cl⁻/Cl₂)	備考
Ce³⁺/Ce	-3.08	NaCl・2CsCl塩、973K
Np³⁺/Np	-2.73	
Pu³⁺/Pu	-2.71	Pu金属として析出させる場合にはU等も同時に析出
U³⁺/U	-2.44	
U⁴⁺/U	-2.20	
Zr⁴⁺/Zr	-2.17	一部FPが混入
Pu⁴⁺/Pu	-2.03	
UO₂²⁺/UO₂	-0.58	一部FPが混入
Pd²⁺/Pd	-0.48	一部FPが混入
PuO₂²⁺/PuO₂	0.21	PuO₂は電気伝導度が小さいため単独析出不可能
NpO₂²⁺/NpO₂	0.47	

高速実験炉の再処理施設

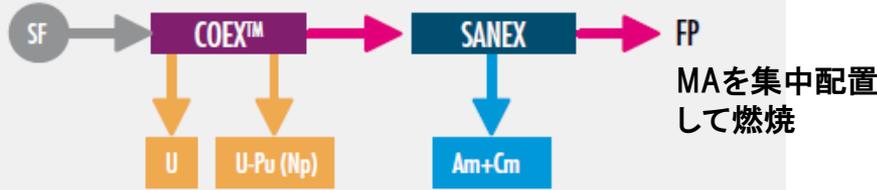


http://seniordesign.engr.uidaho.edu/2005_2006/supra/Team%20Website/Documents/Semi-Continuous%20Uranium%20Product%20Removal.html

2013年 湿式法で99.9%のMA回収に成功

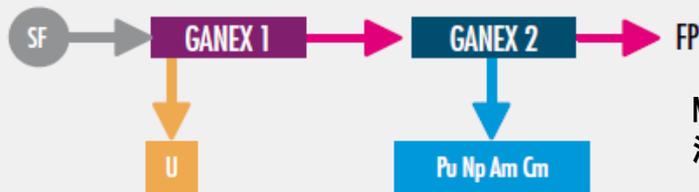
SEPARATION PROCESSES

ENHANCED SEPARATION



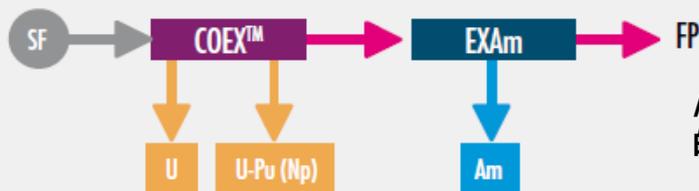
FP
MAを集中配置
して燃焼

GROUP SEPARATION



MAを燃料に
混ぜて燃焼

RECOVERY OF Am ALONE



Amを集中
的に燃焼

SF: spent fuel
Am: americium
Cm: curium
U: uranium
Pu: plutonium
Np: neptunium
FP: fission products

CEA: Report on Sustainable
Radioactive Waste
Management(2012)

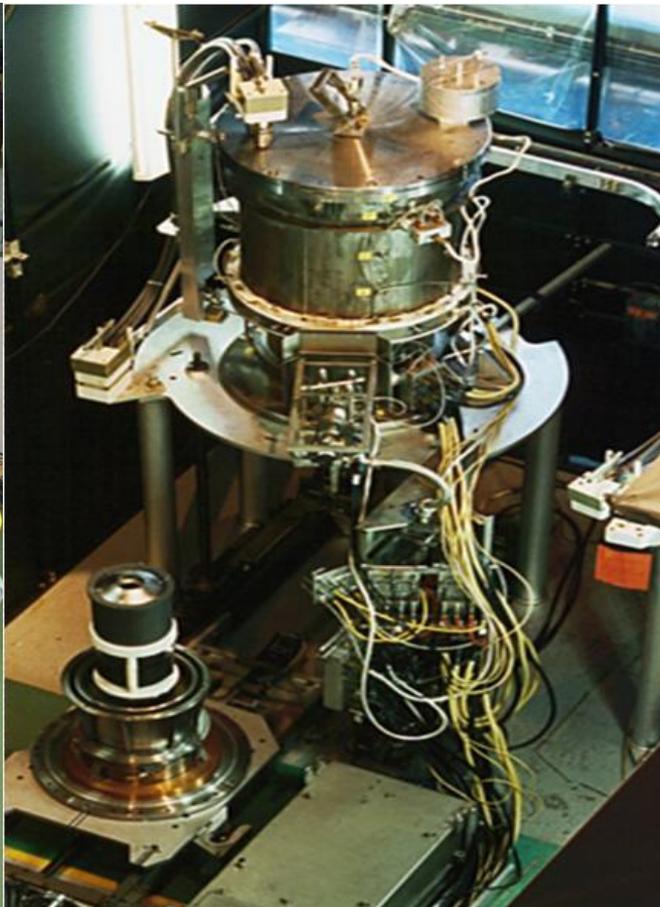
2012年報告書:
数Kg試験を実施して
99%を上回るMA回収
率を確認した

2013年国際会議:
SANEXプロセスで
Am,Cmの回収率を
99.9%に向上
GANEXで99.5%の
Np,Am,Cm,Puを回収

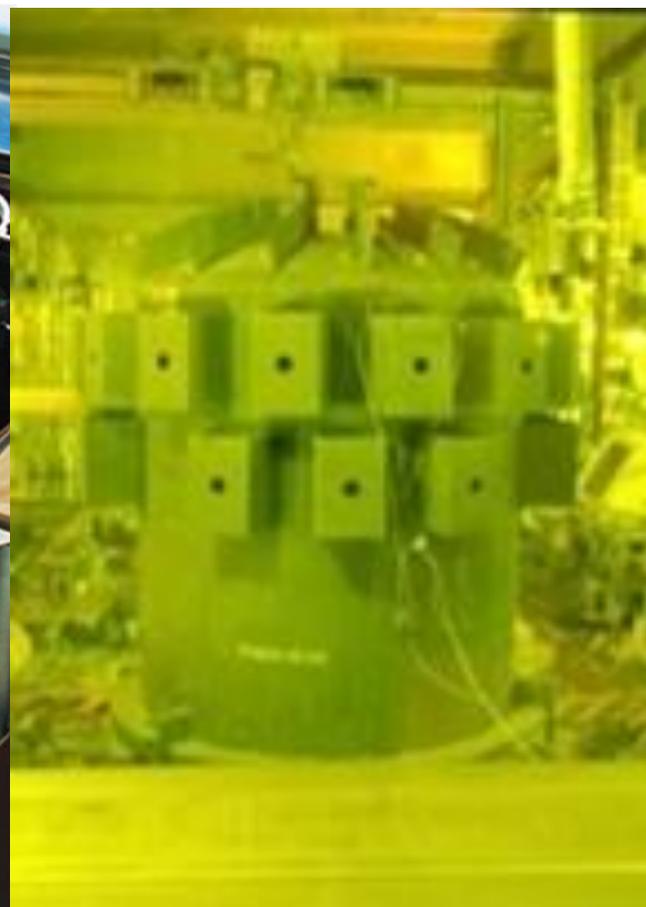
2010年までに乾式法で4400Kgの使用済み燃料、 ブランケットを処理：回収率～99.9%



固体陰極によりウ
ランを回収

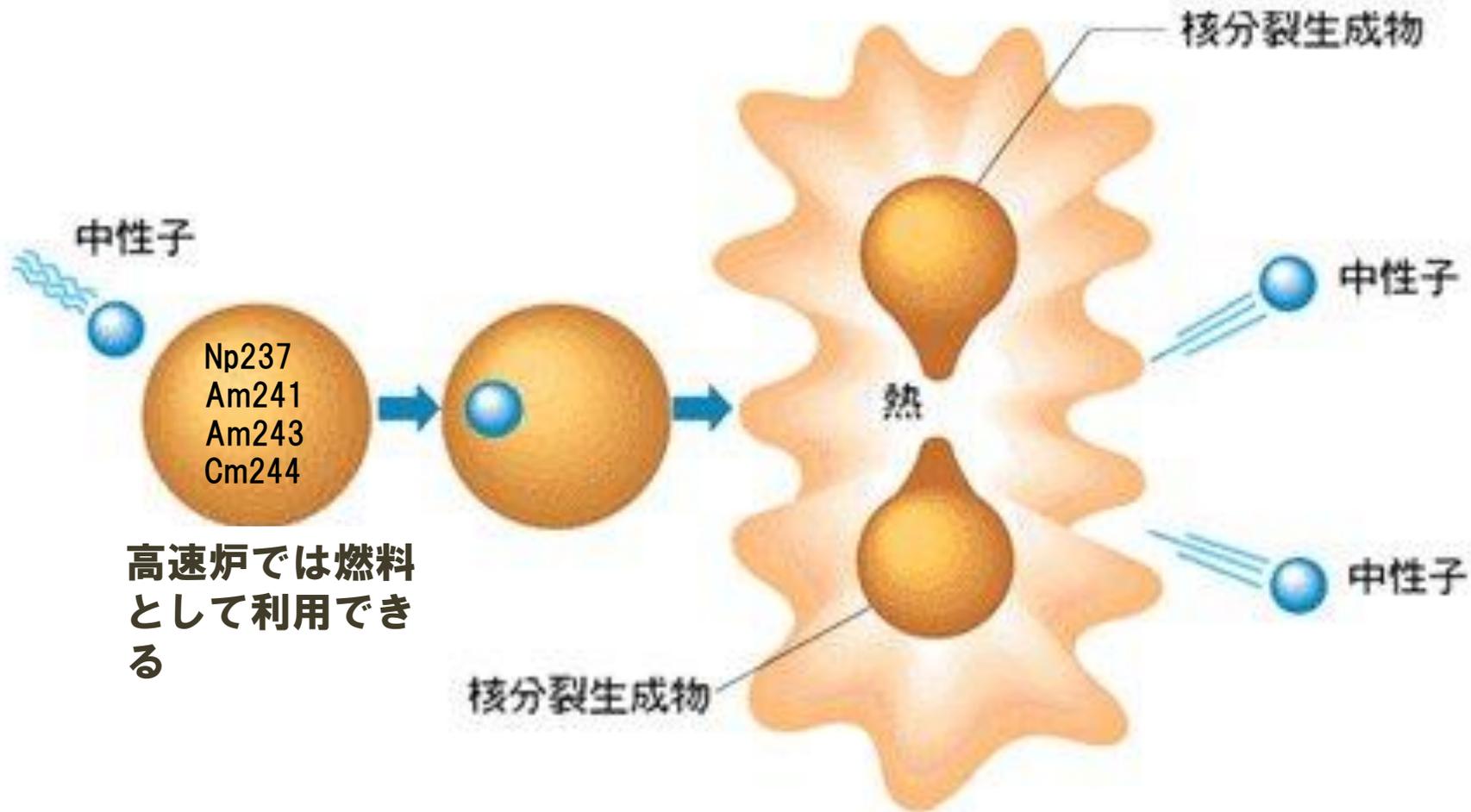


液体陰極によりPuと
MAを回収



廃棄物のゼオイト固化

高速炉ではMAは核分裂して消滅



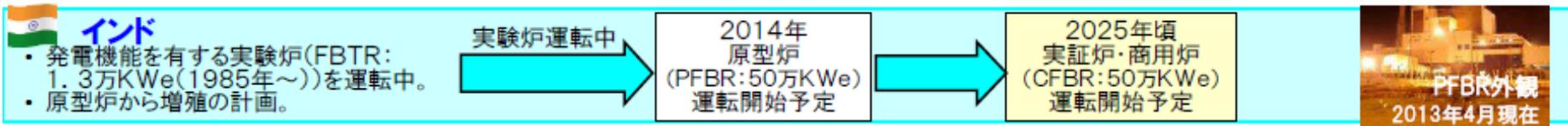
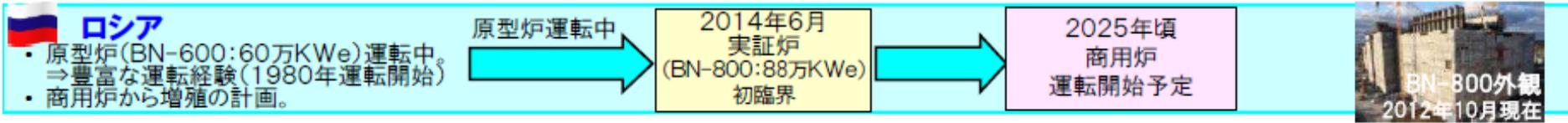
<http://www.pref.aomori.lg.jp/sangyo/energy/001-2-3.html>

世界の高速炉開発・実用化の現状

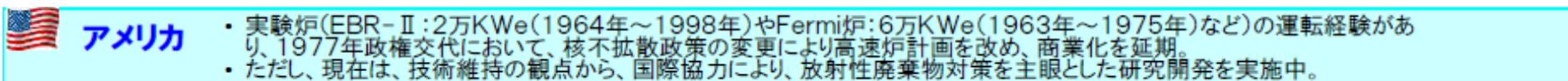
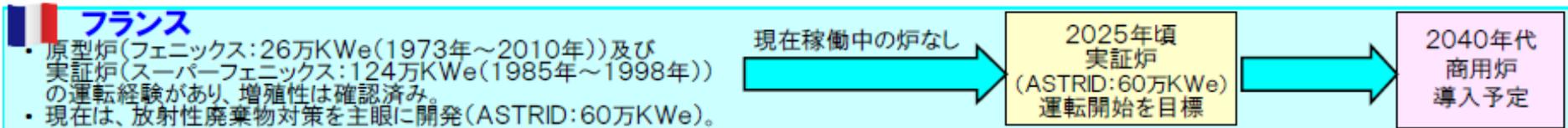
総合資源エネルギー調査会 原子力小委員会第6回会合

「核燃料サイクル・最終処分に関する現状と課題」平成26年9月 資源エネルギー庁

①エネルギーセキュリティの観点から増殖を志向



②増殖技術を習得した上で廃棄物対策中心



フランス Super Phoenix 120万KWe
1985-1998年

<http://www.nuclear.pl/energetyka,fbr,0.html>

ロシア BN800 80万KWe
2014年6月 臨界

<http://spacenuclear.jp/nuclear/fuel2.html>



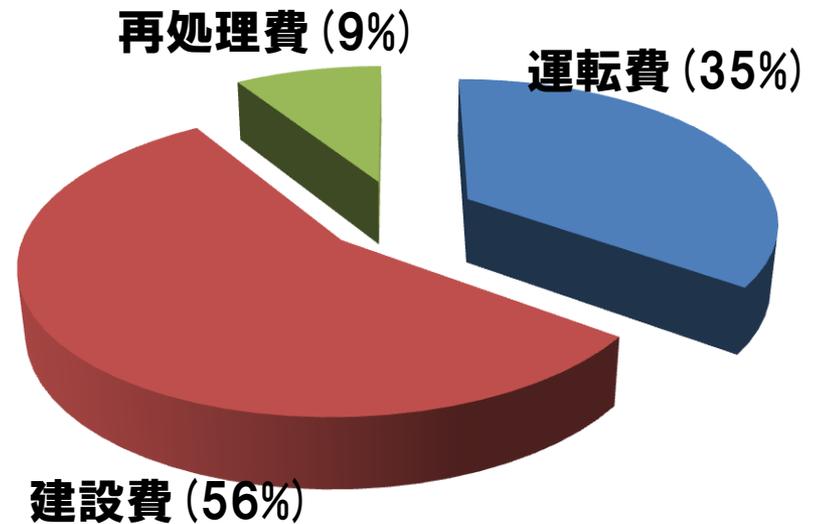
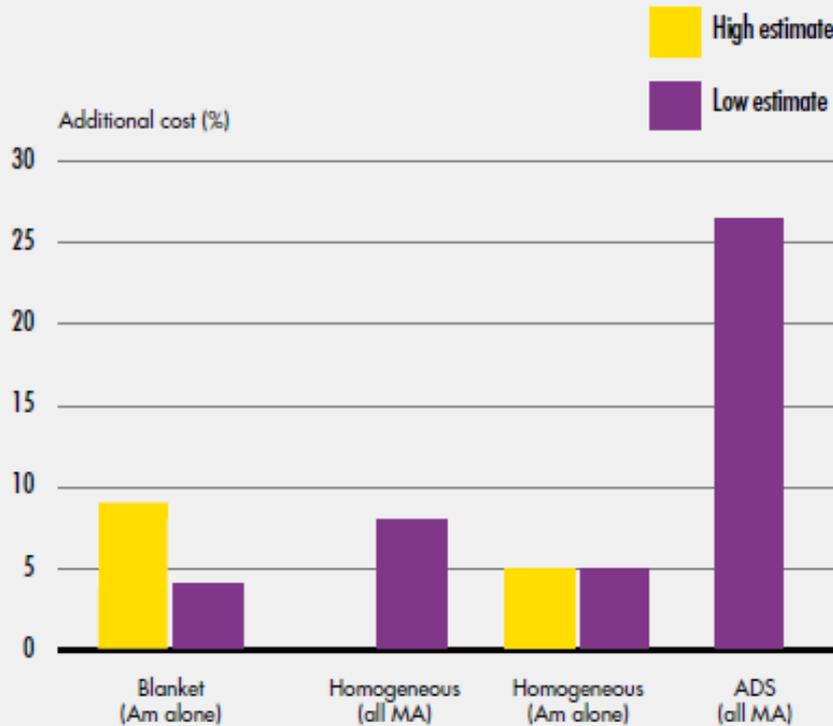
調査のまとめ (1/2)

評価項目		フランス		アメリカ		韓国	日本の展望 (提案)
使用済み燃料蓄積量		2030年までにMOXは3800トン 2040年までに濃縮後の劣化ウランは450000トン		2012年時点で70000トン 2070年には140000トン		2009年時点で 10000トン	2014年時点で17000トン 2070年までに軽水炉を運転 停止する場合に49000トン
地層処分	安全評価	ガラス固化体 主要核種 I-129, Se-79, Cl-36 <0.25mSv/y(基準値)		直接処分 主要核種 I-129, Tc-99 <0.15mSv/y(基準値)		-	ガラス固化体 主要核種 Cs-135, Se-79 <各国基準値以下
消滅処理	MA回収	<ul style="list-style-type: none"> ・SANEX: PUREXの後段でAmとCmを回収 回収率: 99.9%(2013) ・EXAm: PUREXの後段でAmのみを回収 ・GAMEX: すべてのMAをPuとともに一括回収 回収率: 99.5%(2013) 		<ul style="list-style-type: none"> ・電解精製原理による乾式法 ・LWR使用済み燃料からMAを99.5%以上で回収した実績あり ・処理を繰り返すことで原理的には100%回収が可能 ・IFR(Integrated Fast Reactor)を推進していた時期あり 		<ul style="list-style-type: none"> ・アメリカ乾式処理技術を導入 ・ウラン試験施設を完成(100Kgのウランを電極に回収できる大型施設運転中) 	展望 <ul style="list-style-type: none"> ・2014-2054: 六ヶ所再処理工場+高レベル廃液からMA回収 ・第二再処理工場: 2054年以降に国内と海外分を再処理し、TRU(Pu+MA)回収 ・高速炉サイクル: 原子炉に隣接した再処理施設とMA混合燃料製造
	MA消滅	Na冷却高速炉をフランス国内で追及: 実証炉ASTRIDを建設してAm消滅から実施 規制局との対話を開始	他の手段(ガス冷却、加速器駆動原子炉システム)の高速炉については欧州他国との国際協力で実施を検討	Na冷却炉IFRのための実用原子炉としてPRISMを検討 対象とする 予備的安全評価書(NRC)	他の高速炉について現在概念設計段階(TWR, EM2, 他)	Na冷却高速炉PGSFR(Pototype of Gen-IV Sodium Cooled Reactor) 概念設計段階	展望 <ul style="list-style-type: none"> MA消滅高速炉(推奨は転換比1、代替とし転換比ゼロ)から高速炉群を立ち上げて2070年までにすべてのMAを消滅させる ・その後は増殖炉として発電ら寄与
	政策	The 2006 Program Act on the Sustainable Management of Radioactive Materials and Waste (2006)		Blue Ribbon Commissions “ Blue Ribbon Commission on America’s Nuclear Future; Report to the Secretary of Energy” (2012)		次の米韓原子力協定の改定では、最低、乾式再処理を実施する権利を確保すべく交渉中	<ul style="list-style-type: none"> ・エネルギー基本計画(2014.4) 展望 <ul style="list-style-type: none"> ・軽水炉から高速炉(高レベル廃棄物を出さない原子力発電に転換)への移行シナリオを提案すべき

調査のまとめ (2/2)

CEA "Report on Sustainable radioactive Waste Management"
December 2012

ESTIMATED SUPPLEMENTAL COSTS PER kWh (%)



高速炉リサイクル発電コストの内訳例
(フランス:MA消滅なしの場合)

**高速炉によるMA消滅を行う場合、発電コストの増加は現状の発電コストと比較して5-10%以内である
(発電コストを支配するのは建設費)**

日本の課題解決のための 高速炉の利用

廃棄物消滅処理と原子力発電量確保

日本の課題

■2014年の軽水炉使用済み燃料の総量
17000トン

■プルトニウムとマイナアクチニドの総量
170トン →高速炉の燃料として利用可能

■マイナアクチニドの総量
17トン →高速炉で消滅

エネルギー基本計画

第4節 原子力政策の再構築

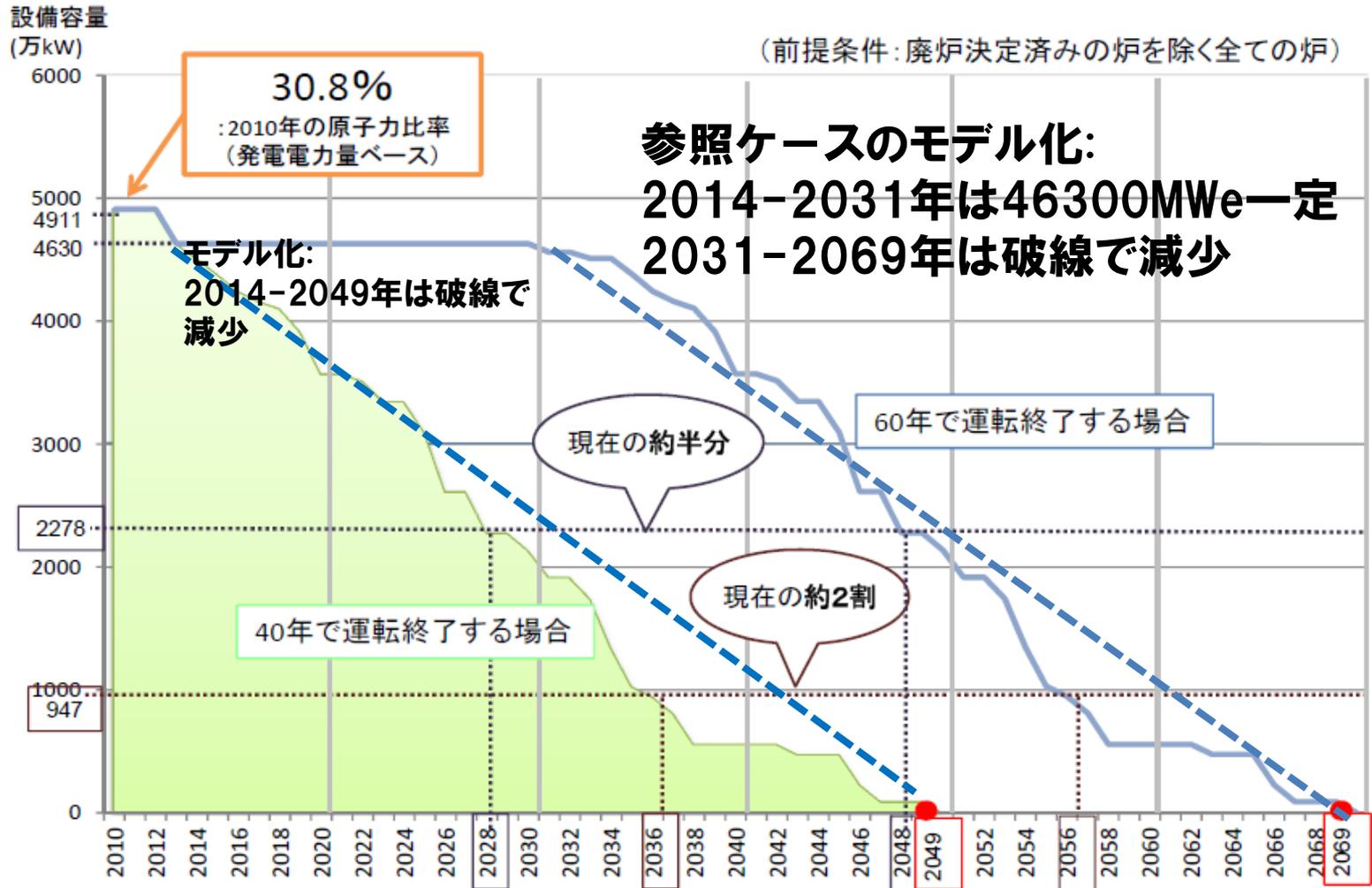
我が国は、資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減等の観点から、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウム等を有効利用する**核燃料サイクルの推進**を基本の方針としている。

使用済燃料の処分に関する課題を解決し、将来世代のリスクや負担を軽減するためにも、**高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減**や、資源の有効利用等に資する核燃料サイクルについて、これまでの経緯等も十分に考慮し、引き続き関係自治体や国際社会の理解を得つつ取り組むことと

核燃料サイクルに関する諸課題は、短期的に解決するものではなく、中長期的な対応を必要とする。また、・・・対応の柔軟性を持たせることが重要である。特に、今後の**原子力発電所の稼働量とその見通し、これを踏まえた核燃料の需要量や使用済燃料の発生量等**と密接に関係していることから、こうした要素を総合的に勘案し、状況の進展に応じて戦略的柔軟性を持たせながら対応を進める。

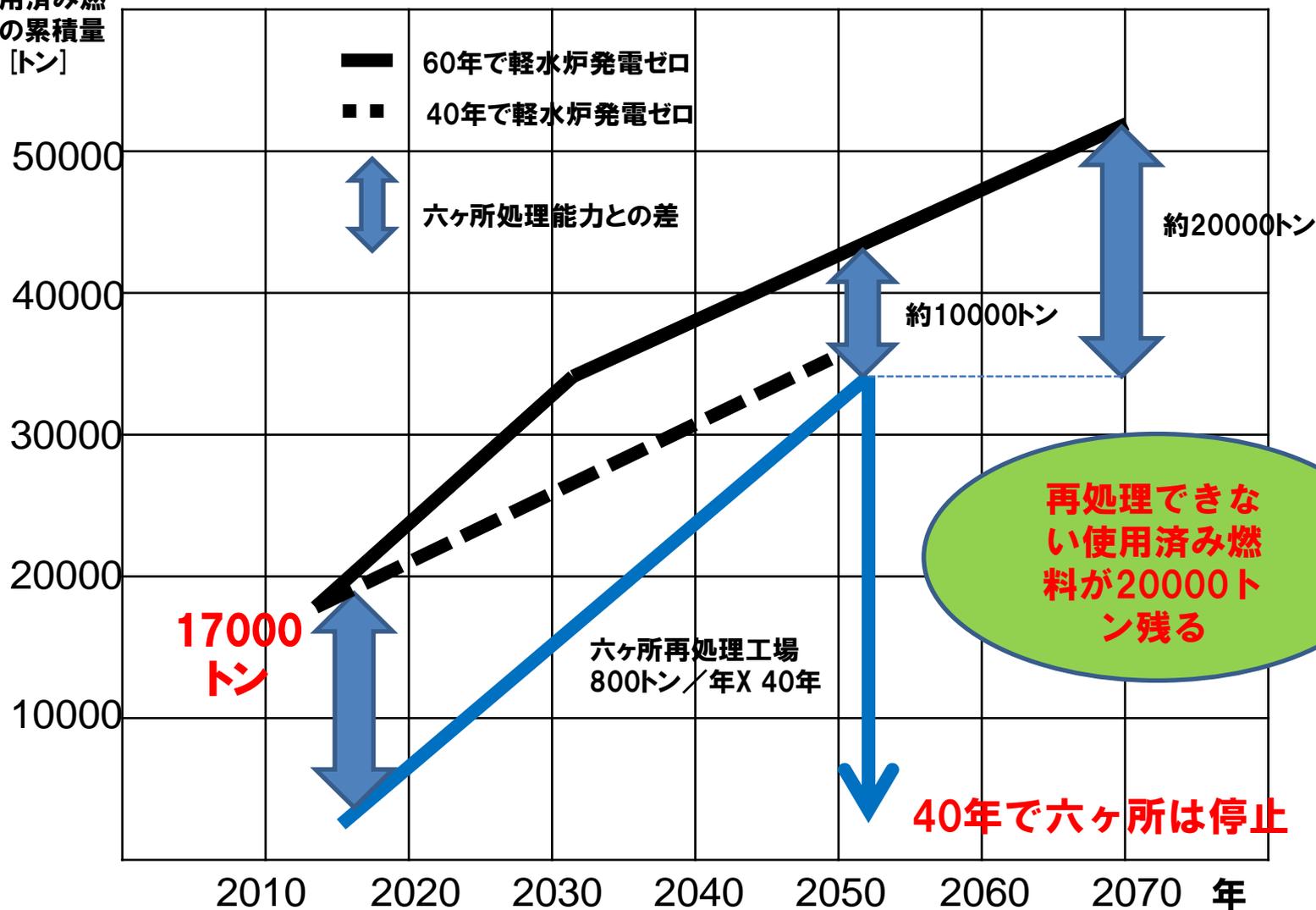
軽水炉による発電比率の将来展望

- エネルギー基本計画策定のためのデータ例 -



軽水炉使用済み燃料の累積量

使用済み燃料の累積量
[トン]



PuとMA〔()内〕の積算量

[単位 トン]

軽水炉の運 転期間	2014年の 積算量	2049年の 積算量	2069年の 積算量	2100年の 積算量
40年で運転 終了	170 (17)	331 (33)	-	-
60年で運転 終了	170 (17)	451 (45)	496 (50)	-
100年で運 転終了	170 (17)	494 (49)	679 (68)	964 (96)

諸量については次の文献を参照にしている

資源エネルギー庁 “今後の原子力政策について” 基本政策分科会第七回会合 資料1 平成25年10月

安藤 他 “使用済軽水炉燃料中の核種変化” JAERI-Research 99-004, 1999

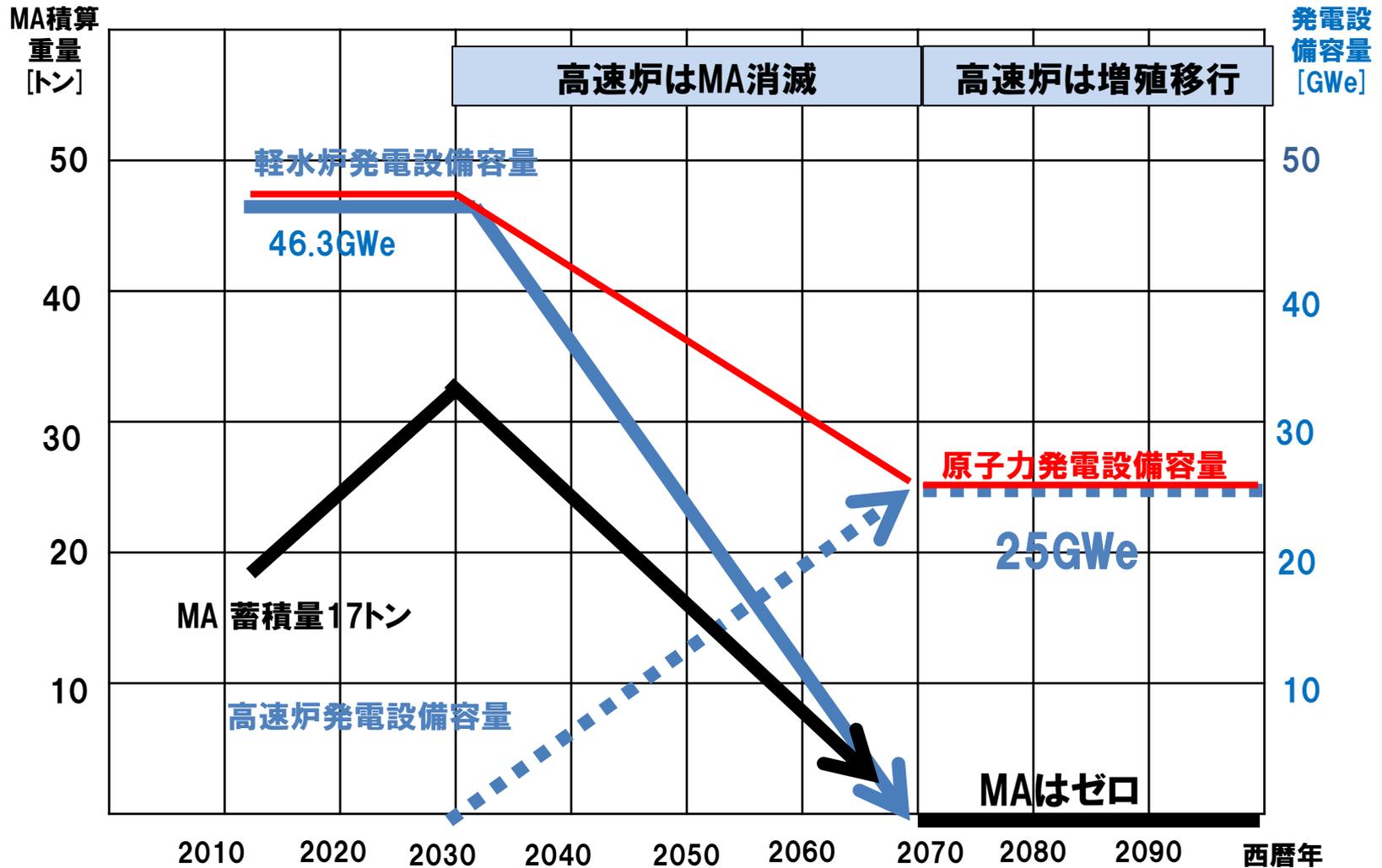
原子力委員会 原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会資料「核燃料サイクルの諸量・経済性評価について(解説資料)」平成24年6月

高速炉を運転するために必要な燃料の量

燃料: Pu, MA	増殖比 1	参考:増殖比 0
初装荷 (ton/1000MWt)	3.6	2.96
取り替え分 (ton/1000MWt・年)	0	0.36
40年間の必要な総量 (ton) (再処理側にある一炉心分 を追加)	$3.6 + 3.6$ →7.22	$2.96 + (0.36 \times 40)$ + 2.96 →20.3
発電量 (MWe) /1000MWt	370	370
必要燃料量 (ton/GWe)	19.5	55 (54.9)

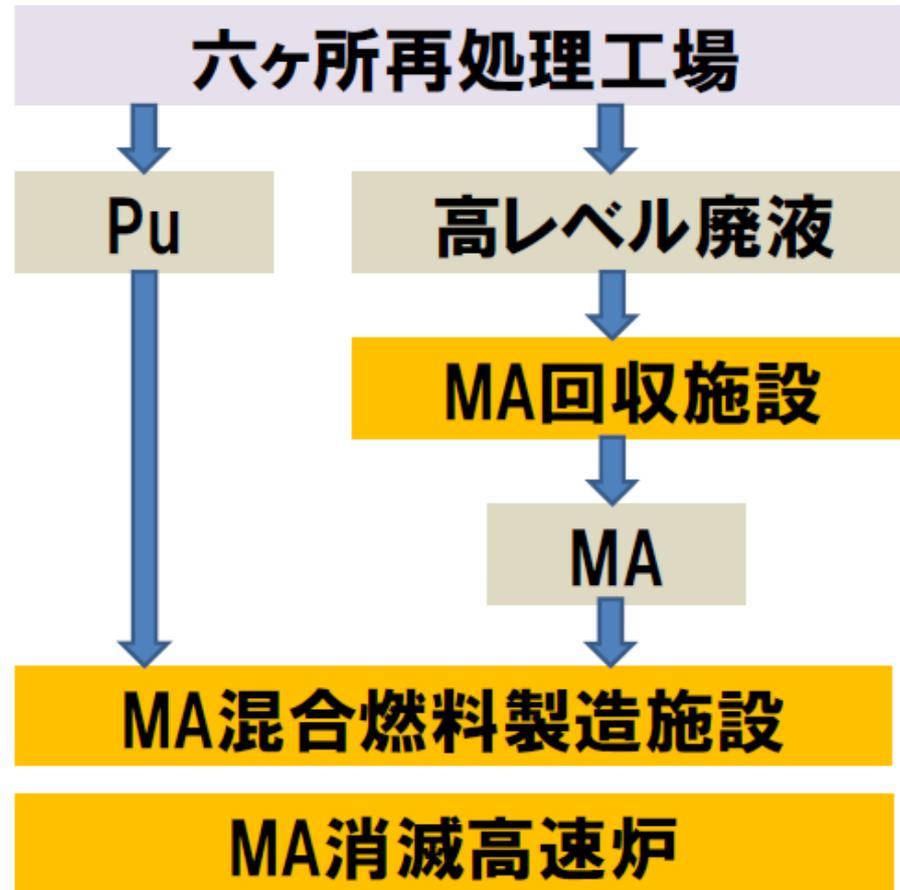
増殖比が1の低増殖炉心高速炉の運転を運転するためには19.5トン/GWeの燃料が必要である

高速炉を2030年から導入する効果



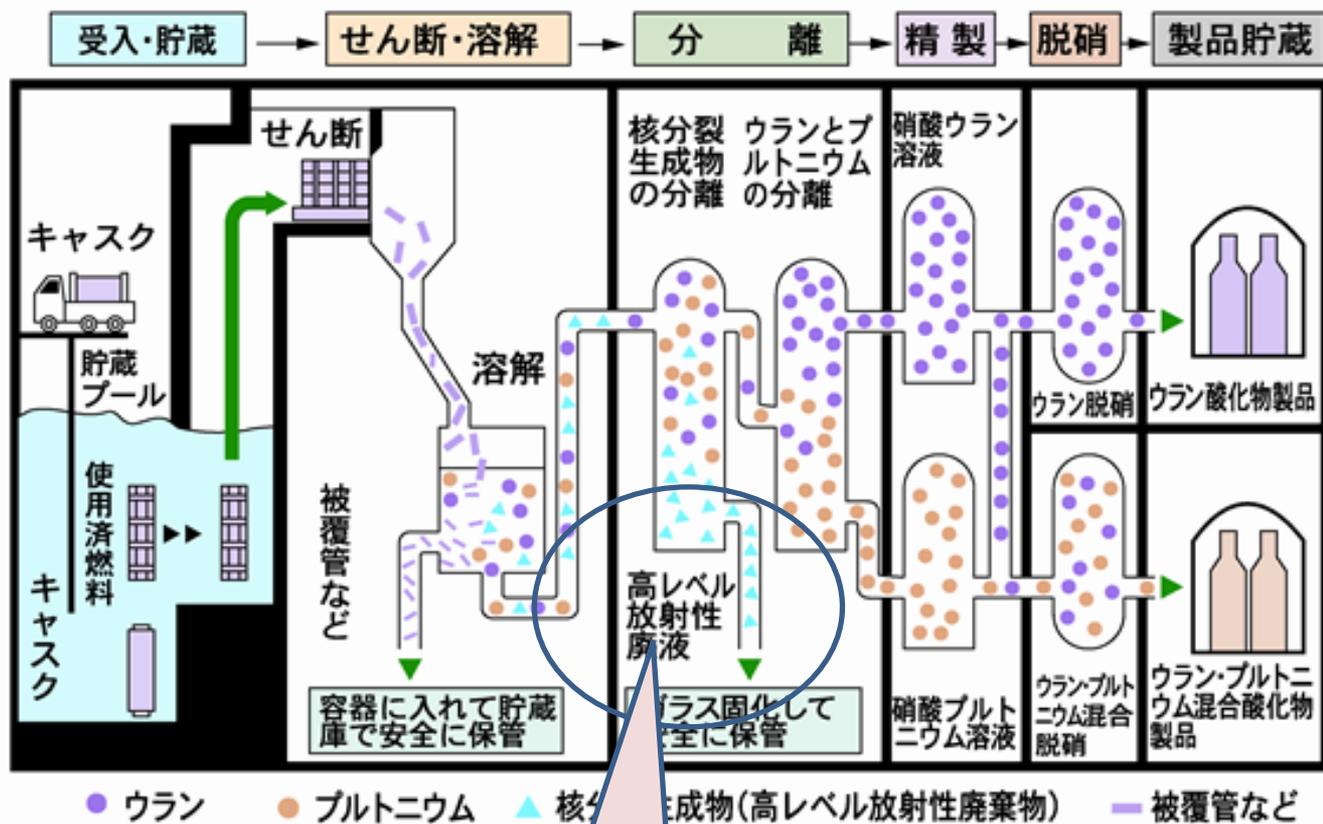
2070年までにすべての長半減期高レベル放射性廃棄物は消滅する

実現のためのステップ: Phase I (~2054)



六ヶ所再処理工場の高レベル廃液からMAを回収
回収し、MAは高速炉で消滅

六ヶ所施設の高レベル廃液からMAを回収



MA回収

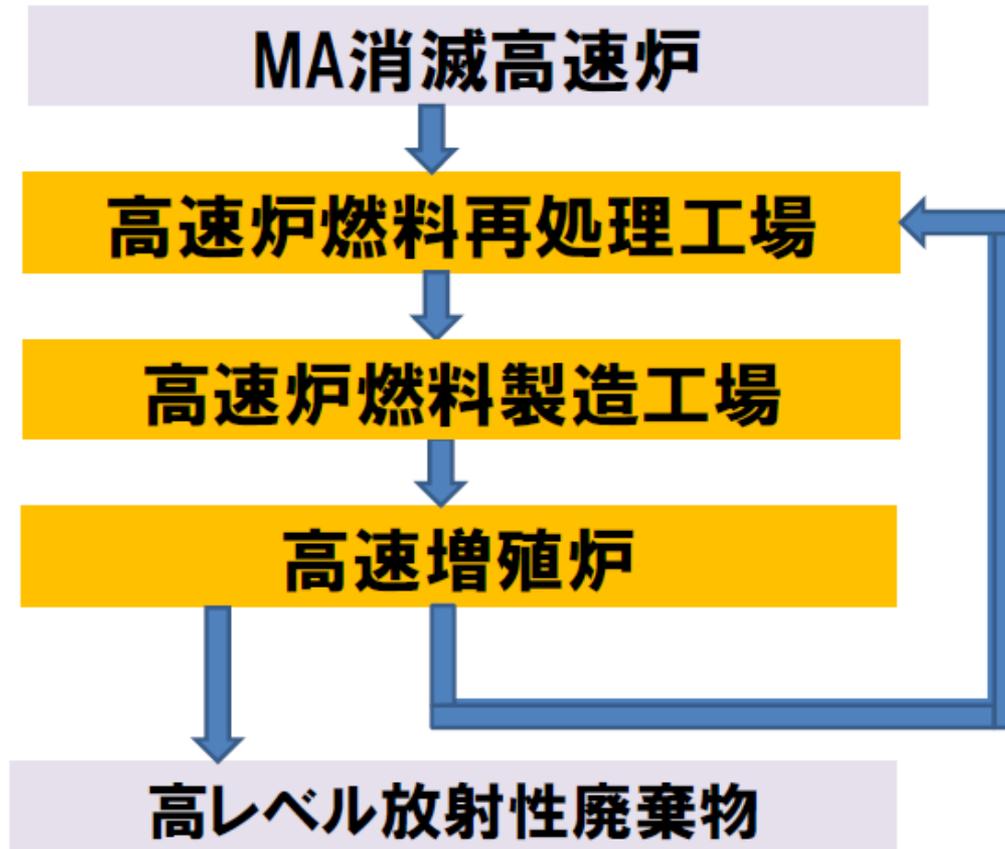
技術確立が必要

実現のためのステップ:Phase II (2054~)



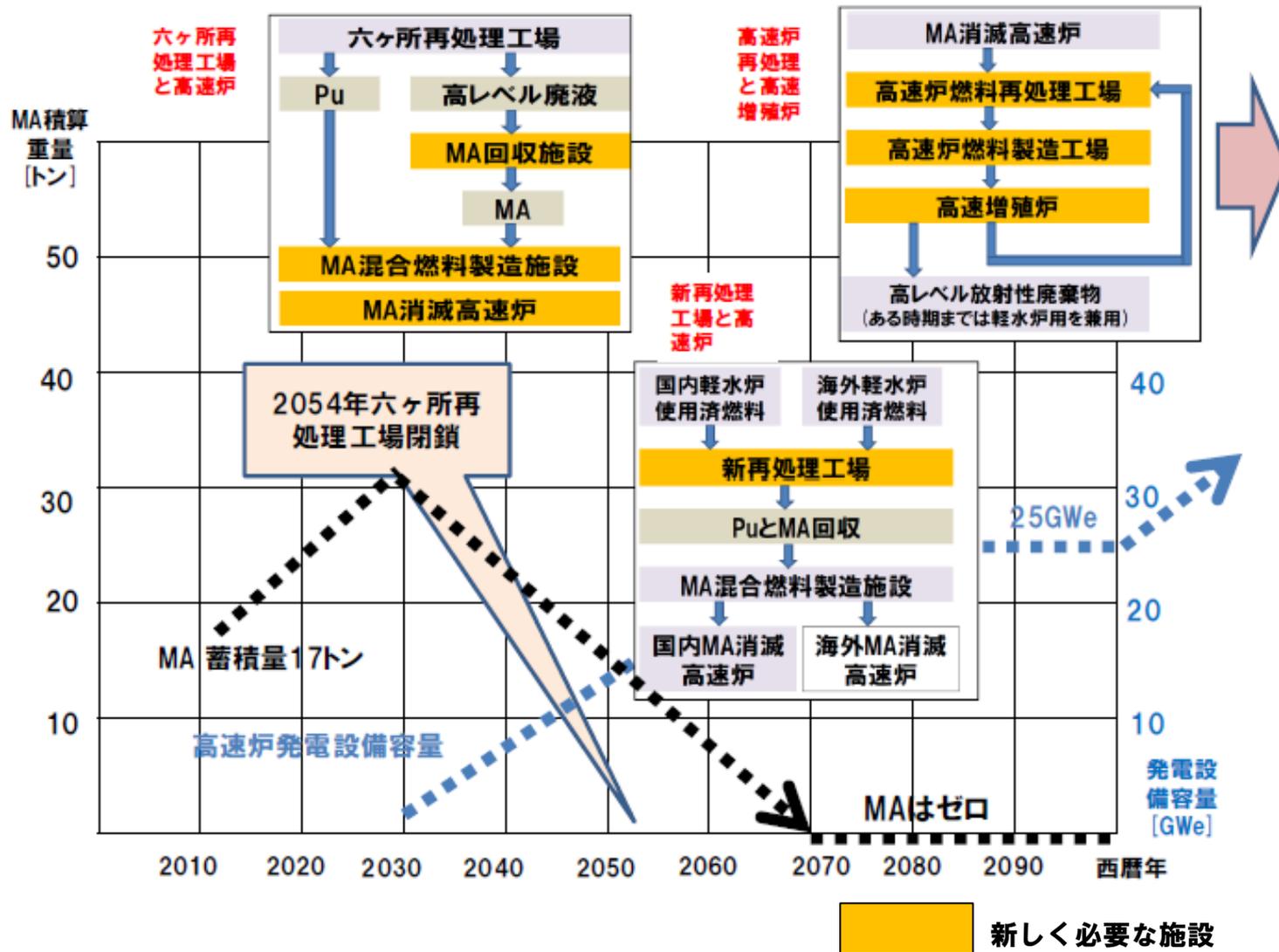
新再処理工場では、国内の軽水炉使用済み燃料
20000トン、海外分を10000トン进行处理

実現のためのステップ: Phase III (2070~)



高速炉リサイクル(高速炉使用済み燃料再処理、サイクル)を完成させる

日本の課題（廃棄物処理と原子力発電量の確保）解決のためのロードマップ



エネルギー基本計画

第4節 原子力政策の再構築

原子力の利用においては、いかなる事情よりも安全性を最優先することは当然であり、我が国の原子力発電所では深刻な過酷事故は起こり得ないという「安全神話」と決別し、**世界最高水準の安全性を不断に追求**していくことが重要である。

具体的には、安全確保を大前提に、プルサーマルの推進、六ヶ所再処理工場の竣工、MOX燃料加工工場の建設、むつ中間貯蔵施設の竣工等を進める。・・・**米国や仏国等と国際協力を進めつつ、高速炉等の研究開発に取り組む。**

もんじゅについては、廃棄物の減容・有害度の低減や核不拡散関連技術等の向上のための国際的な研究拠点と位置付け、・・・**もんじゅ研究計画**に示された研究の成果を取りまとめる・・・
応など克服しなければなら

Post Fukushima : 高速炉の安全確保の方向

	軽水炉の対応	高速炉の安全確保の方向
長期の直流電源喪失	可搬型直流電源の充実	崩壊熱除去系過冷却対応が必要
損傷炉心冷却	格納容器下部で損傷炉心を確実に冷却	原子炉容器内での損傷炉心の確実な冷却が必要
意図的な航空機落下	特定重大事故等対処施設 (中央制御室と完全独立)	崩壊熱除去系機能の性能向上と多様性が必要
海外動向	—	<ul style="list-style-type: none"> ・ボイド反応度低減への規制の関心と事業者の取組み (フランス、ロシア) ・蒸気発生器の信頼性向上

各国の航空機落下対策

	英国	フランス	フィンランド	ドイツ	スイス	米国	日本
崩壊熱の除去	<ul style="list-style-type: none"> ・物理的に分離された4区画 ・海水ポンプを建物内に収納 ・取水できない場合に空冷式徐熱 	物理的に分離された4区画	<ul style="list-style-type: none"> ・物理的に分離された4区画 ・各区画に中圧及び低圧安全注入系と蓄圧注入系 	<ul style="list-style-type: none"> ・独立した崩壊熱除去系 ・独立した機器冷却系 ・独立したヒートシンク（1970年代から設置、バックフィット完） 	<ul style="list-style-type: none"> ・独立した崩壊熱除去系 ・水源は地下水（1970年代から設置、バックフィット完） 	<ul style="list-style-type: none"> ・2011年のテロ対策として発令されたB.5.bガイドラインで対応（可搬設備） ・福島対応Tier 1で3段階アプローチ ①既設設備の活用 ②可搬設備 ③サイト外支援で長期機能維持 	特定重大事故等対処施設の設置を要請（新規則第四十二条） <ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建物から100m離隔していること、または大型航空機の衝突に対して頑強性を持つこと ・重大事故に対処する機能が損なわれないこと ・格納容器の穂孫を防止するため設備を有すること ・外部支援が受けられる7日間、使用うでること（パブリックコメントH26年9月5日終了）
格納容器	<ul style="list-style-type: none"> ・二重格納容器（鉄ライナーと1.3mプレストレスコンクリートの格納容器を1mの半球殻で覆う） 	二重格納容器（金属ライナーとプレストレスコンクリートを鉄筋コンクリートの外側格納容器で覆う）	二重格納容器（フランスと同じ）	上記の除熱系は原子炉建物とは別の建物に設置	上記の除熱系は原子炉建物とは別の建物に設置	同上	

二重格納容器

独立した建物

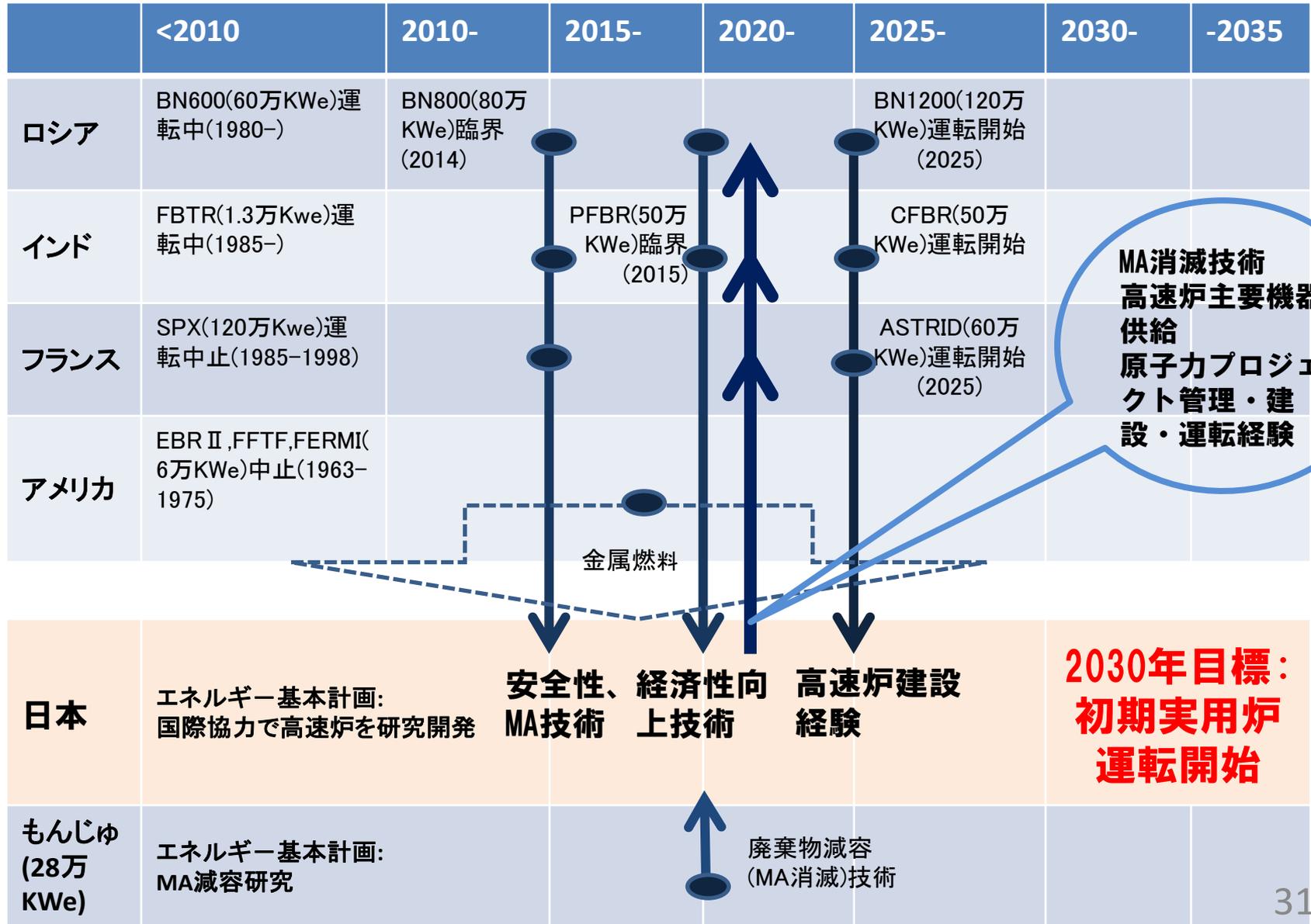
EPR（二重格納容器）フラマンビルサイトの 建設現場

2010年9月



二重格納容器の外側のコンクリート容器は
1.8mの厚さである

初期実用炉開発のためのロードマップ



日本の課題解決のための総括

- 2030年までにプルトニウムとMAを六ヶ所再処理工場から分離し2054年まで継続
 - 2020年までに「もんじゅ」によるMA消滅データ蓄積
 - 2030年に高速炉初期実用炉運転開始
 - 2054年以降に新再処理工場導入
 - 2070年までに軽水炉を高速炉にリプレース
-
- 2070年までに長半減期高レベル放射性廃棄物をゼロ
 - 2070年に発電設備容量として25GWeを確保

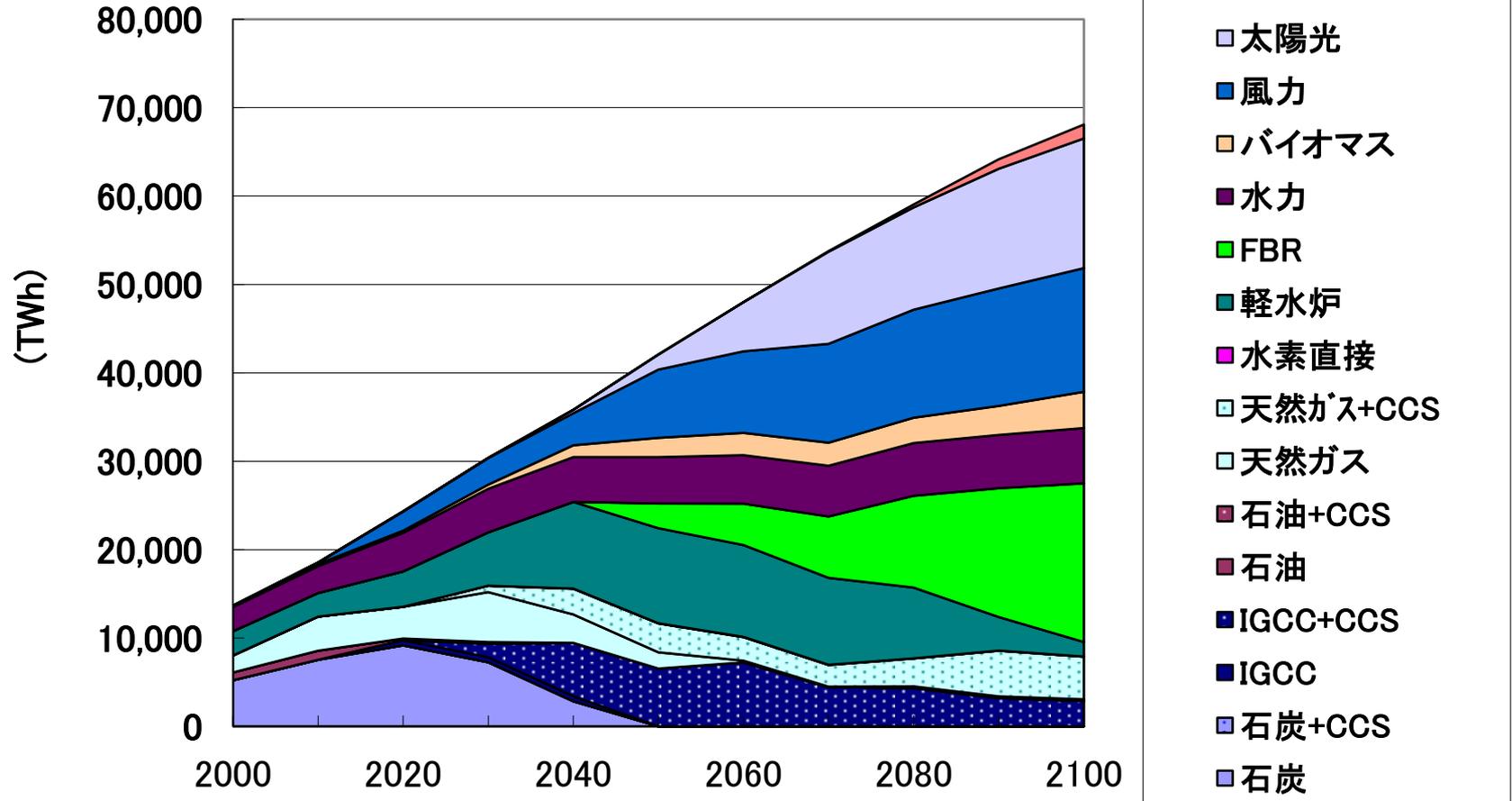
世界の課題解決のための 高速炉の利用

温暖化対策としての高速炉の利用

「GRAPE」:世界の発電割合の目標設定

キヤノングローバル戦略研究所作成

発電電力量内訳(世界計)



2100年の原子力の発電量(主としてFBR)に着目

世界の使用済み燃料

■2010年の軽水炉使用済み燃料の総量

334500トン

内閣府・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(第8回)『使用済み燃料管理問題と中間貯蔵の重要性—世界の動向(資料第3-1号)』2012.2.23,

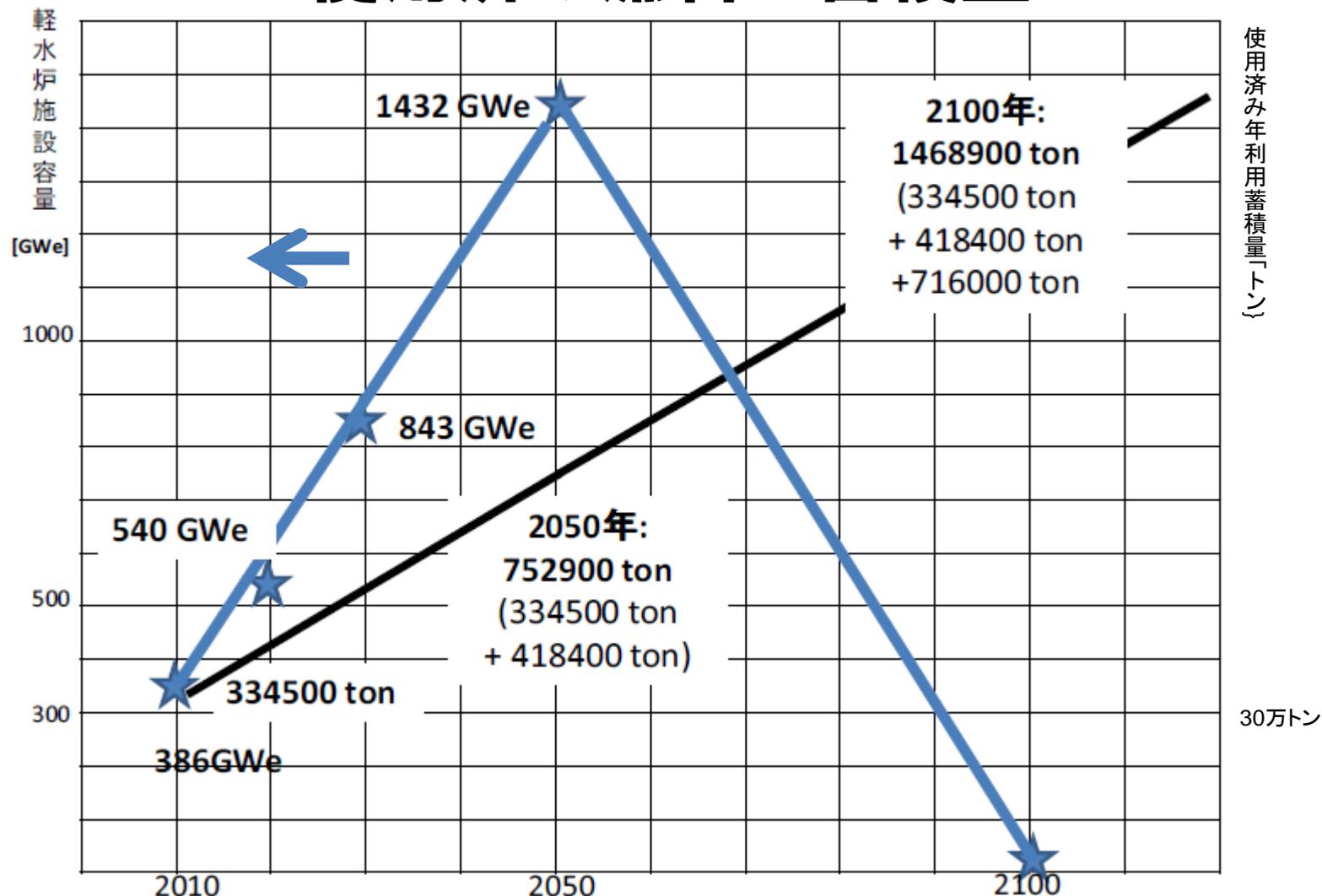
■プルトニウムとマイナアクチニドの総量

3345トン →高速炉の燃料として利用可能

■マイナアクチニドの総量

335トン →高速炉により消滅

世界の軽水炉発電の今後の予測と 使用済み燃料の蓄積量



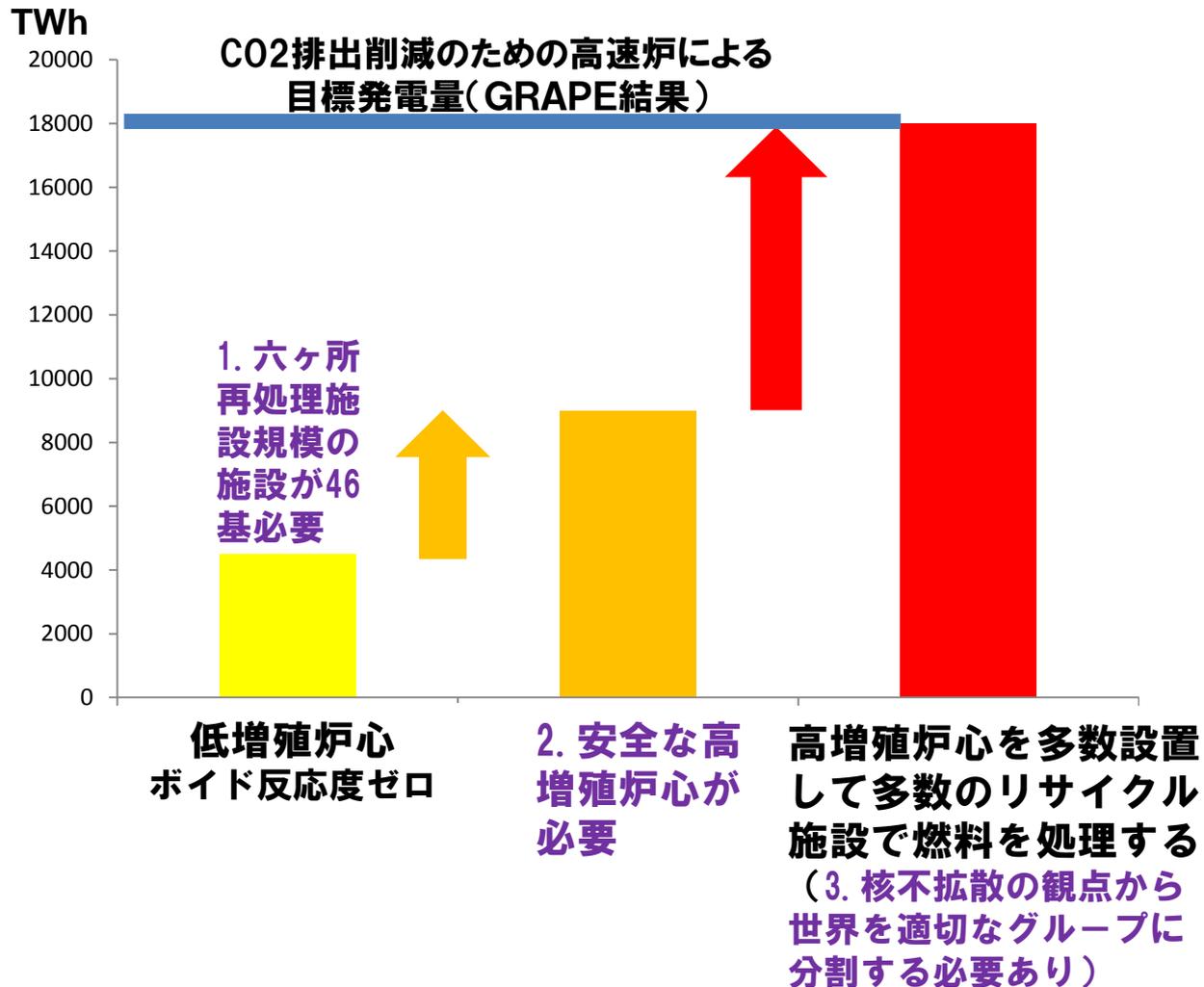
1,468,900 tonの1%が高速炉の燃料として利用できる

低増殖炉心 (ボイド反応度ゼロ) 高速炉による発電量

	GRAPEの結果 (目標設定)		検討結果	
	軽水炉	高速炉	軽水炉	高速炉
2010年	2664 TWh	0	2358 TWh	0
2050年	10757 TWh	2787 TWh	8799 TWh	-
2100年	1654 TWh	17942 TWh	0	4500 TWh

1. 高速炉の燃料であるTRU (Pu, MA) を軽水炉の使用済み燃料から分離する必要があり、そのために軽水炉再処理施設が、六ヶ所相当の容量で**46基必要**である
2. 2100年までに導入できる高速炉 (増殖比1) は4500 TWhの発電量までである
3. **より多くの発電量を得るために、高い増殖比を持つ燃料・炉心を使う必要がある**

目標発電量を達成するための課題



課題の確認

■高速炉

高い増殖性とボイド反応度低減の両立

■燃料サイクル

国境を越えた使用済み燃料の再処理

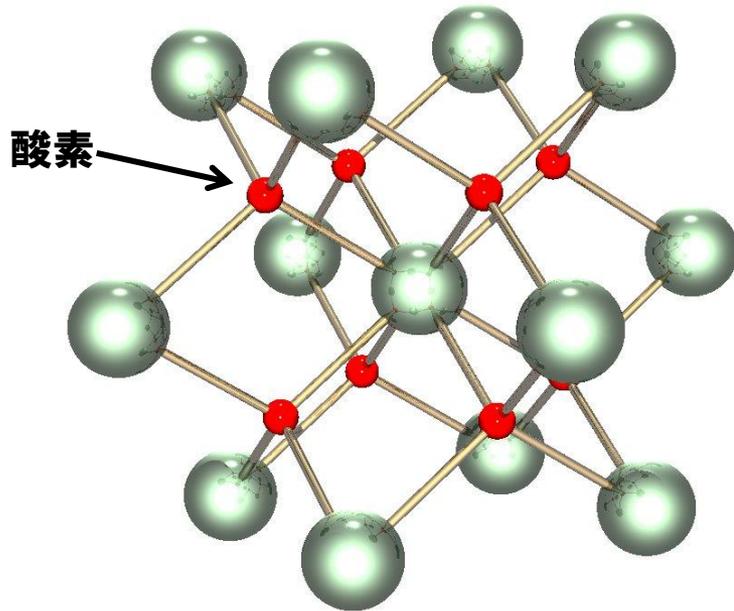
高速炉炉心の特徴と考慮すべき安全性

	軽水炉	高速炉
燃料	濃縮U U-235 3~5% U-238 97~95%	Pu 20~30% U 80~70% 増殖性 U + 中性子 → Pu
出力密度	50~100 KW/ℓ	400~1000KW/ℓ
炉心出口温度	~300℃	~500℃
ボイド反応度	負	正

フランス	ASTRID	ボイド反応度負に規制が関心
ロシア	BN800, BN1200	ボイド反応度負を規制が要求

軽水炉と同等の安全性:ボイド反応度低減に注目

酸化物燃料(U,Pu)O₂と金属燃料の特徴

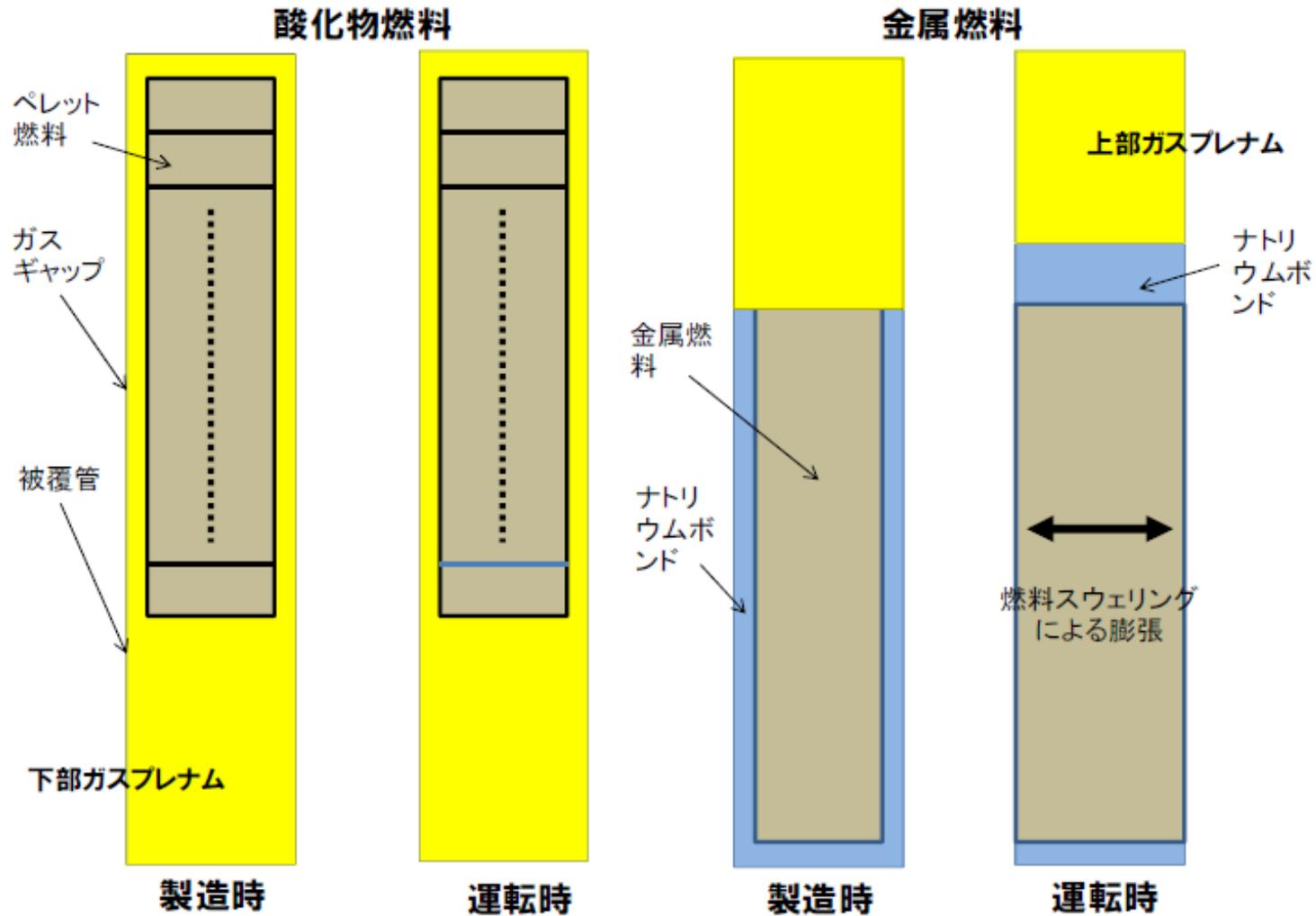


酸化物燃料の格子構造

	酸化物燃料	金属燃料
重金属密度 (g/cc)	9.7	14.1
増殖比 (燃料体積比 35%の場合)	1.2	1.4
ボイド反応度 (単位[\$] 1000MWe炉心 の場合)	6	8

重金属密度が大きい金属燃料は高い増殖性が得られる一方、ボイド反応度は核分裂が促進される割合が増加するので酸化物燃料よりも大きい、両燃料ともボイド反応度低減が必要

酸化物燃料の形状と金属燃料の形状の特徴



燃焼によって発生する放射性生成物ガスを密閉するためのガスプレナム位置が酸化物燃料ではボイド反応度低減に効果的 (ロシアの発明)

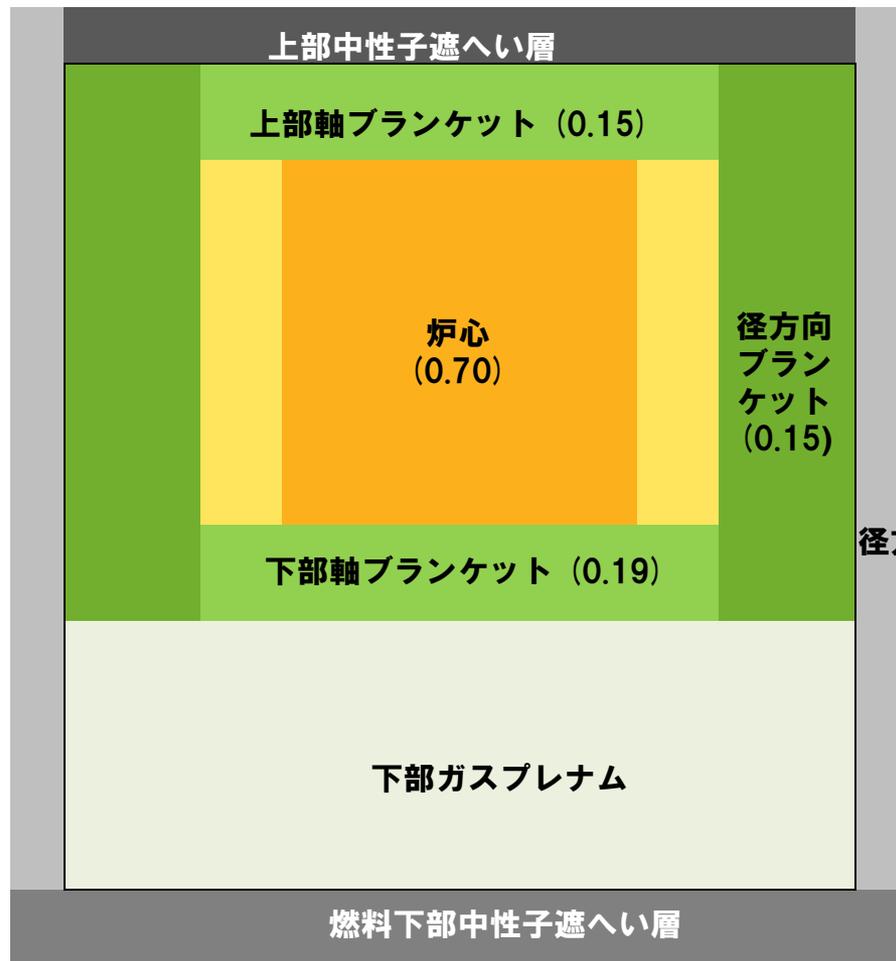
世界で展開すべき高速炉の炉心候補

炉心燃料	増殖比	インベントリ 倍増時間 (年)	複合インベ ントリ倍増 時間(年)	ボイド反 応度 (ドル)
高増殖炉心 (酸化物燃料)	1.19	47	32	6
低増殖炉心 (酸化物燃料)	1.01	900	623	0
超高増殖炉心 (金属燃料)	1.43	17	12	8
高増殖炉心 (金属燃料)	1.20	46	32	~0

方向性: 高密度の金属燃料で構成する扁平化炉心でボイド反応度を低減する(他に高密度の窒化物燃料でナトリウムプレナムによりボイド反応度を低減する方向性もある)

参考：高増殖炉心（酸化物燃料）

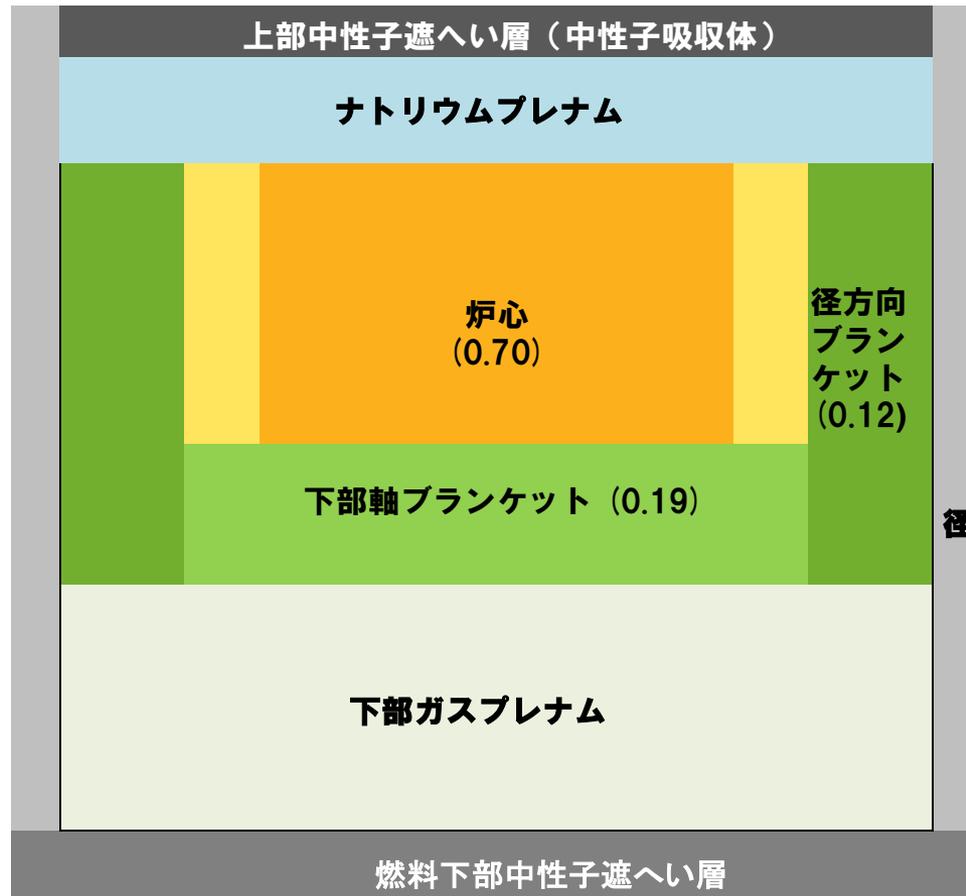
増殖比 1.19 ボイド反応度 6\$



注：増殖には軸方向ブランケットが寄与している

参考：低増殖炉心（酸化物燃料）

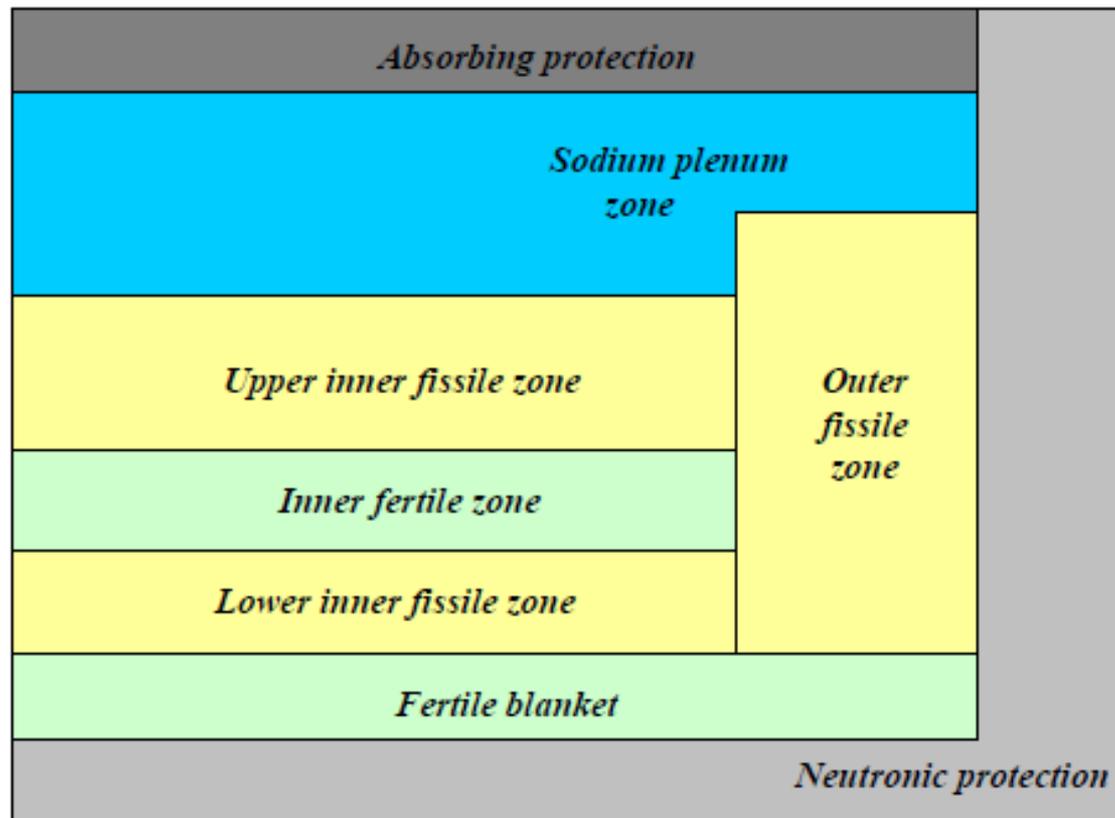
増殖比 1.01 ボイド反応度 0\$



注：上部軸ブランケットを削除してこの領域がボイドになるナトリウム層を形成すると中性子が逃げやすくボイドは大きく低減する

参考：ASTRID（仏国実証炉）の低増殖炉心

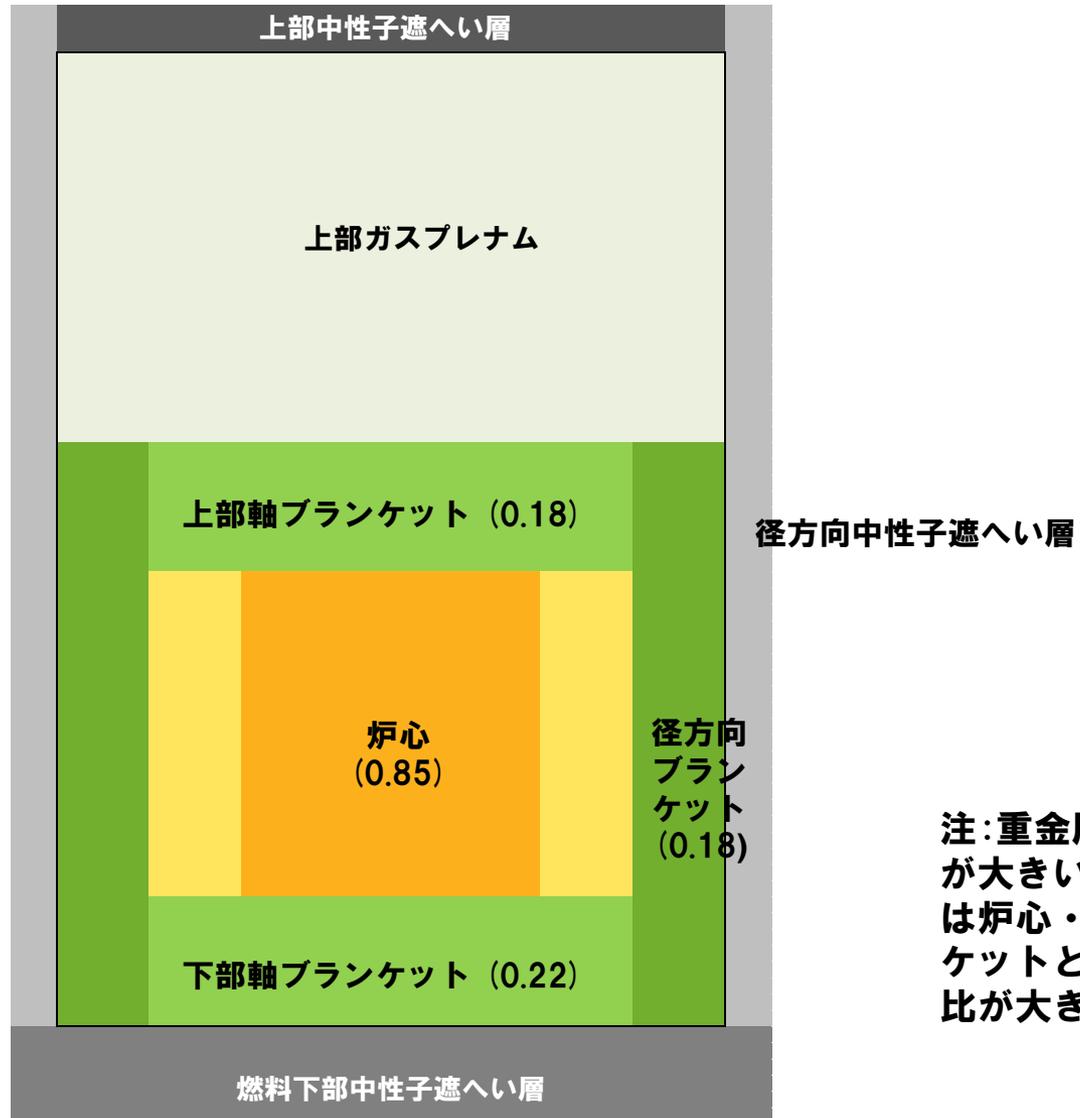
酸化物燃料 増殖比 1 ボイド反応度 0\$



ボイド反応度低減のためにナトリウムプレナムを採用している

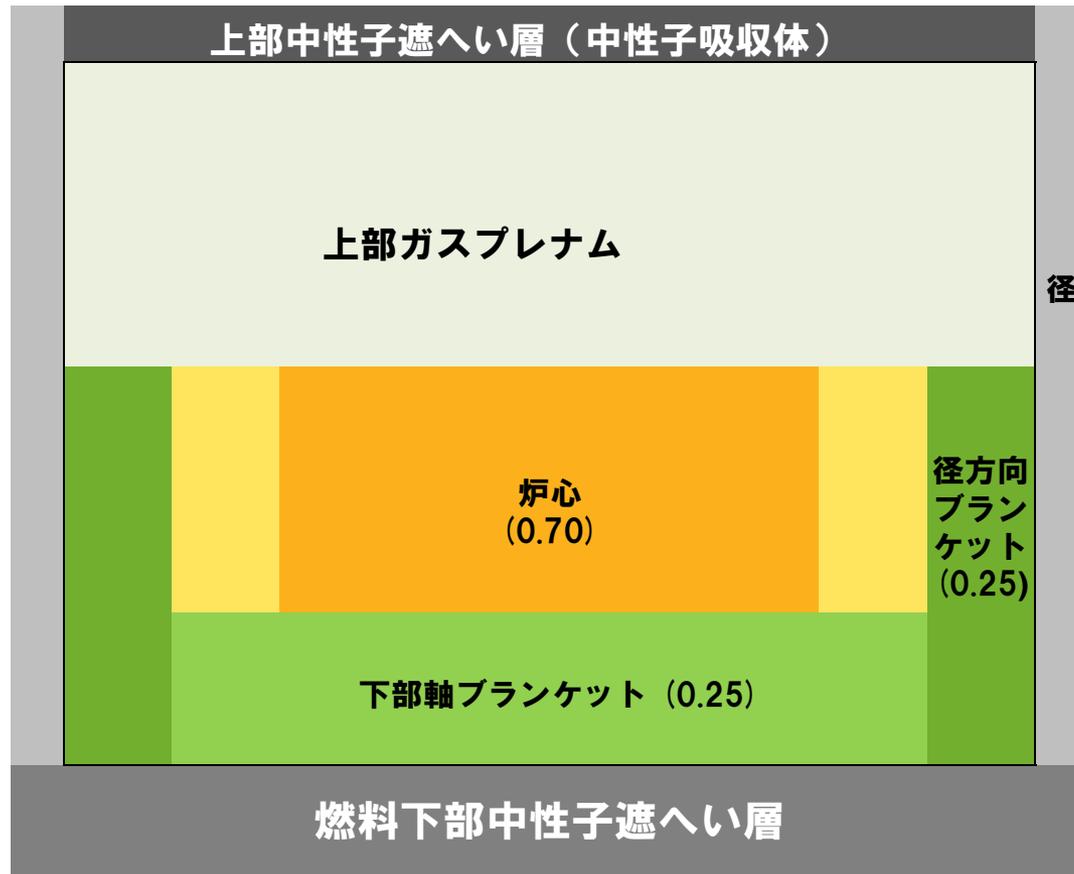
参考：超高増殖炉心（金属燃料）

増殖比 1.43 ボイド反応度 8\$



参考：高増殖炉心（金属燃料）

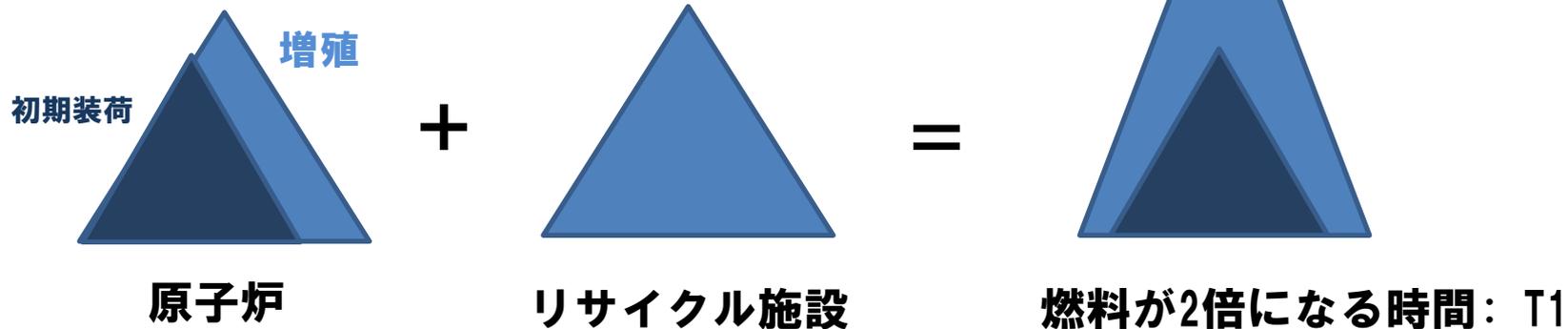
増殖比 1.20 ボイド反応度 $\sim 0\$$



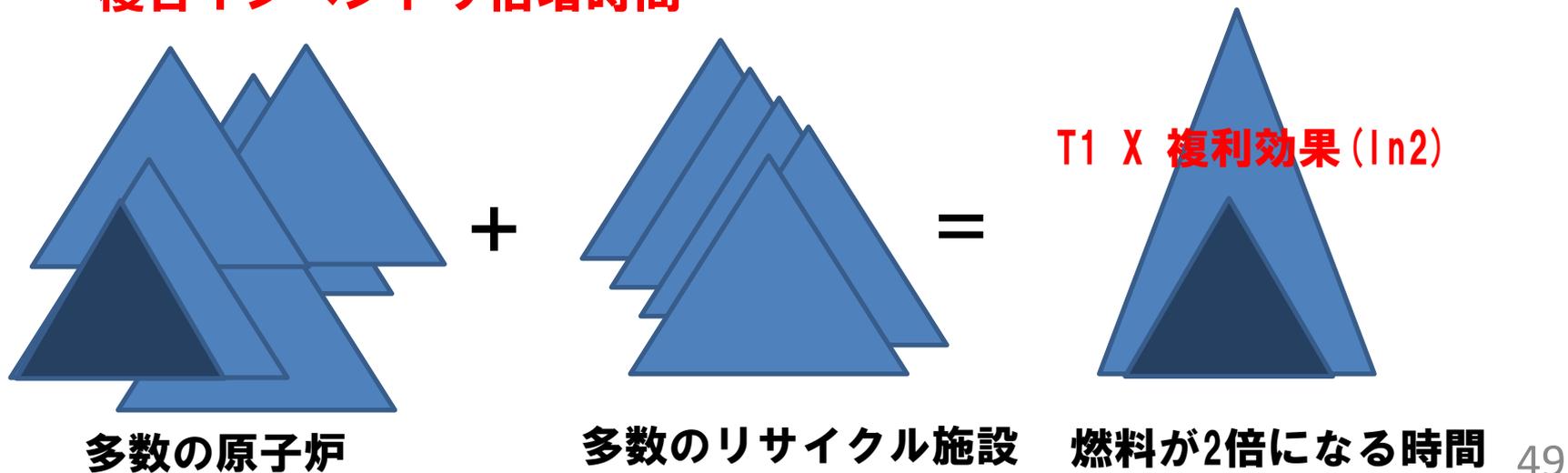
注：ガスプレナムを上部に設ける必要がありナトリウム層を形成させることができない、ボイト低減には炉心の扁平化が必要

参考：増殖と増倍時間

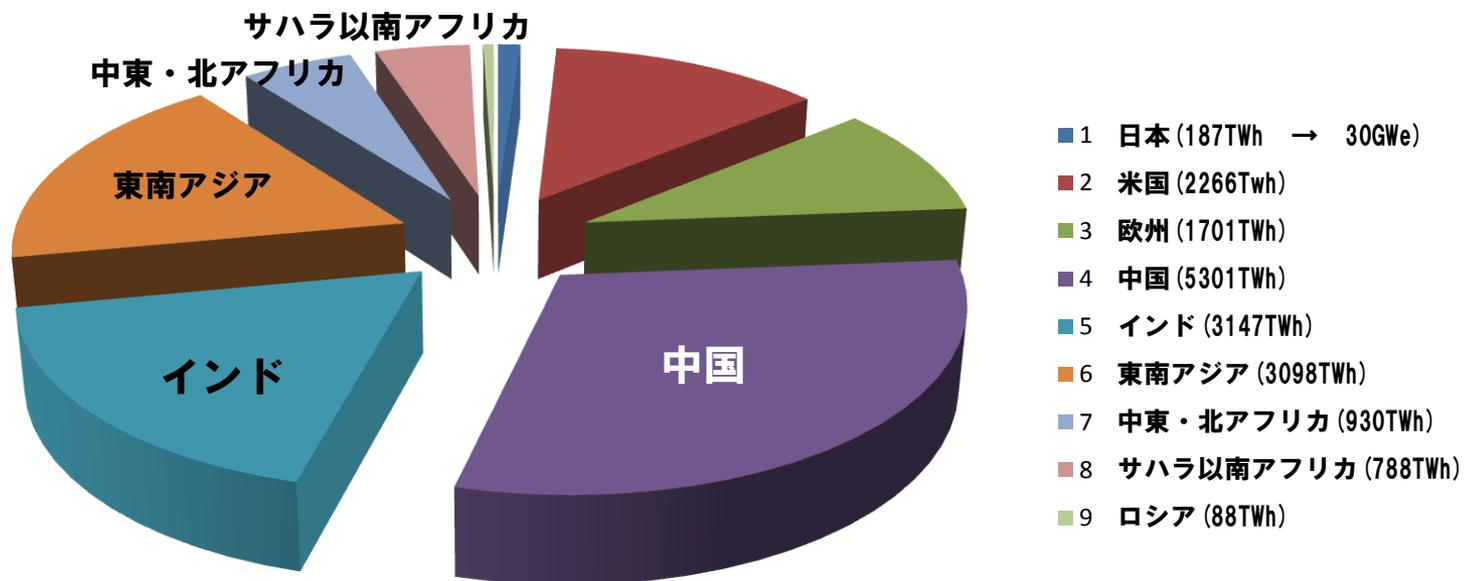
インベントリ増倍時間



複合インベントリ増倍時間

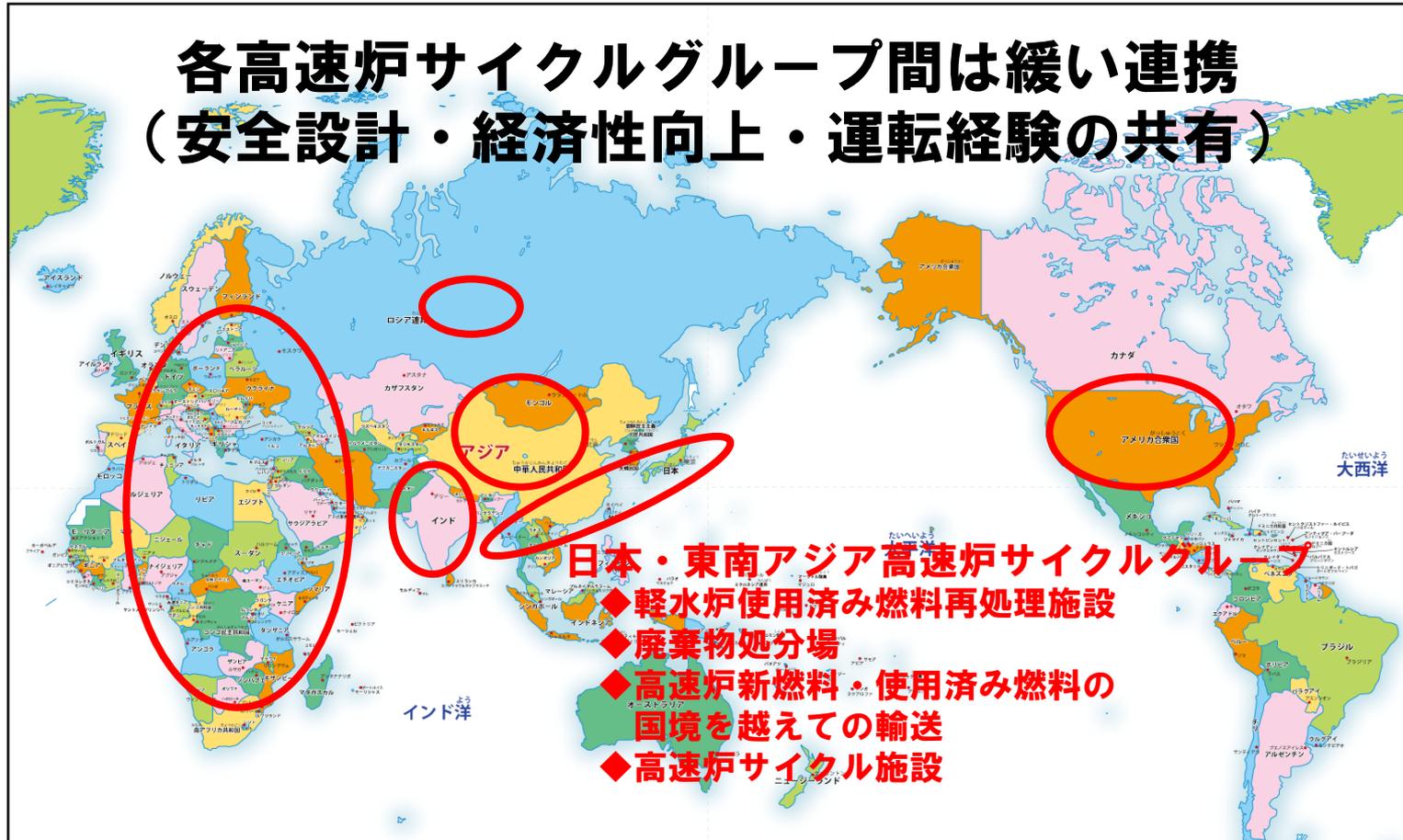


高速炉発電が必要な地域と発電量 - 「GRAPE」による2100年の展望 -



核不拡散の観点から高速炉サイクルグループという世界システムの必要性が示唆される：グループ単位で軽水炉燃料再処理と高速炉燃料リサイクルを行う

高速炉サイクルグループの可能性（私案）



高速炉サイクルグループ内は強い連携
（国境を越えて新燃料・使用済み燃料輸送）

高速炉サイクルグループの役割（私案）

高速炉サイクルグループ	高速炉の型式 (現時点の注力設計)	高速炉発電量 (2100年)	高速炉容量 (2100年)	軽水炉使用済み燃料量及び再処理施設基数*	高速炉リサイクル施設基数 (100ton/年・モジュール)
日本・東南アジア	基本計画:国際協力で開発	3285 TWh	527 GWe	263500 ton 8基	42**
米国	PRISMシリーズ	2266 TWh	363 GWe	181500 ton 6基	29
中国	BNシリーズ	5301 TWh	850 GWe	425000 ton 13基	68
ロシア	BNシリーズ	88 TWh	14 GWe	7000 ton 1基	1
インド	CFBRシリーズ	3147 TWh	504 GWe	252000 ton 8基	40
欧州・アフリカ	ASTRIDシリーズ	3419 TWh	548 GWe	274000 ton 9基	44

* (2100年高速炉設備容量/4) が軽水炉使用済み燃料起源の高速炉設備容量「A」GWe：軽水炉起源高速炉に必要なTRU (Pu+MA) は20 ton /GWe であるので、 $A \times 20 \times 100$ (軽水炉使用済み燃料の1%がTRU) が、必要な軽水炉使用済み燃料の量である(上記表からは140万トンが必要であり、前記147万トンとほぼ一致している)、再処理工場は800トン/年で40年寿命の処理容量を仮定した

** 高速炉燃料取り替え量を8ton/年/GWeとして100 ton/年・モジュールだと12.5GWeを処理

将来展望

1. 国内問題の解決

- 2070年までに軽水炉を高速炉にリブレース
- 2070年までに長半減期高レベル放射性廃棄物をゼロ
- 2070年に発電設備容量として25GWeを確保

2. 温暖化抑制のための世界的な取組の一環として

- 世界レベルの高速炉サイクルグループを形成
- 日本・東南アジア高速炉サイクルグループを樹立
- 必要な軽水炉使用済み燃料再処理施設は8基
- 2100年までに日本・東南アジアで527GWeの高速炉による発電設備を確保
- 地球温暖化防止のための原子力の役割を達成