

1月24日 原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第6回)

番号	ご発言委員 (敬称略)	ご発言 (“→”は対応案)	アクション 担当
1	伴	P. 7 P. 8 ブルーリボン委員会及びOECD/NEAで検討された燃料サイクルの各委員会における検討結果を追加すること	内閣府
2	伴	P. 15 放射性廃棄物が減容するとあるが、再処理することによって廃棄物の総量は増える。減容は高レベル廃棄物のことであり、今の記載は誤解を与えるので見直すこと	対応不要
3	伴	P. 15 資源の乏しい日本とあるが、再生可能エネルギーがあることを考えるとウラン資源が乏しいと限定して記載するべき	内閣府
4	伴	技術選択肢を並べるだけでなく、どういう技術がどこまで成立し得るのかを議論していくべき →評価軸整理の中に技術的成立性を追加するとともに、参考資料として燃料サイクルの絵をつけて視覚的にも補足する	内閣府
5	伴	FRとFBRは技術的観点から大きく異なるのではないかと、その技術情報を提示すべき	JAEA
6	山名	P. 17 廃棄物・使用済燃料管理の施設数、保管量は、燃料サイクルに伴う物量、物流であり技術的特性ではないか。	ステップ2で 対応
7	山名	我が国が作ってきたインフラの現状あるいは今後、インフラを変えた場合にはどのようなものかを考えるべき	電事連
8	田中	MOX燃料を2, 3回とリサイクルすることが出来るのかという技術的、経済的な議論をすべき	ステップ2で 対応
9	田中	MOXの使用済燃料を中期的には貯蔵しておくオプションも考慮すべき	電事連
10	田中	MOX使用済燃料をどのような形(使用済燃料or粉末)で貯蔵しておくのが良いのかというオプションを検討しておくべき →貯蔵の観点から、MOXの使用済燃料の特徴をまとめる	電事連
11	近藤	ウランの値段が上がればワンスルーでは発電単価が上がる、MOXのマルチリサイクルすると安全性の確保が難しくなると言った技術の特性については記載しておいても良い	JAEA
12	田中	アクチノイド燃焼については、どのような燃焼システムがよいのか技術開発の検討オプションとして幅広く検討しておくべき →第6回委員会資料の参考で示した各炉型の特徴を次回再掲し、その一つとして1枚もののADS説明資料を加える	JAEA
13	伴	技術選択肢には現時点での到達点や課題を追記すべき	内閣府
14	山名	技術選択肢に実用化までの課題を記載すべき	JAEA
15	伴	フランスのフェニックスで発生した制御できない出力変動の原因調査を教えて欲しい	JAEA
16	山名	LWRとFBRが共存するサイクルがあってもよいのではないかと(FBRサイクルの中にこれが含まれると考えても良い)	会議で回答 済み
17	山名	P. 10 海水ウラン捕集は、ウラン需給の話であるのでここでの記載は不要ではないか	内閣府
18	山名	P. 13 新型転換炉はFRの代替とはならないのではないかと、どういう趣旨で書いたのか?	対応不要
19	山地 (代理ご発言)	P. 10-13に記載されている代替オプションは不要	ステップ2で 対応
20	鈴木	各技術選択肢の実用化の可能性、そこまでの課題を書き込む	内閣府
21	田中	第2ステップの議論が上手くできるように第1ステップをまとめるべき	電事連
22	鈴木	各技術選択肢の中に、あるオプションを選択すると他の選択肢をとりづらくなるという特徴の記載を含める	ステップ2で 対応
23	伴	各技術的選択肢を並列して評価していくことに違和感を感じる →項目13, 14で対応	内閣府

番号	発言委員 (敬称略)	アウシヨシ 担当	100年程度のシナリオ対比評価をすべきである。これを政策評価と読んでいるのならば、シナリオ評価と呼ぶべき	山名	評価軸として、各技術選択肢の技術的成熟度、現段階、今見えている将来のアウトルック、国内外を視野に入れた整理を加えるべき(過去に積み上げた知的財産等を取捨選択するに当たって、ミット・デミットを評価するため)	内閣府	内閣府	→第4回策定会議資料2-1号P. 34の諸外国の使用済燃料の取扱いをベースに作成する。	田中	各技術選択肢における燃料加工の観点からの技術的成立性や安全性について追加すること →項目13, 14で対応	伴	アウツプ2において、日本の再処理政策が各国に及ぼす影響を記載した方がよい	スツツプ2で 対応	27	伴	評価軸におけるMOX燃料を使用した場合のウラン節約効果とあるが、本来の目的ではないのにこのように記載することはおかしい →余剰Pu抑制のための処置であることの記載をするか検討する	伴	MOX燃料の使用が10～20%のウラン資源の節約となる評価の精査が必要 →前回大綱説明資料を見直す、ただし、歩留まり、冷却期間を考慮する	伴	技術的選択肢の核不拡散については、幅が広いのでいくつかの視点(転用抵抗性、保障措置、計量管理、技術拡散)に絞った方がよい	山名	30	山名	政策選択肢の核不拡散・セキュリティについては、多国間管理など国際的な核不拡散動向に対する整合性を考えるべき 政策選択肢の政策変更に伴う課題については、既存インフラに対する影響という視点で考えるべき 国際的な技術貢献を、技術選択肢の評価軸に加えるべき	又吉	33	山名	廃棄物管理の最適化(再処理だけではなく、サイクル全体を含む)とそれに対する廃棄物マネージメントの自由度(埋設までの管理期間の合理化、コストの合理化)が、どれくらいシナリオによって異なるかが評価には重要→代理からの問い合わせにより、田中委員より、現状の記載で期間と量が入っているの十分だが、さらに低レベルについて含めればよいとご意見あり →対応検討中(アウツプ2でシナリオができていないと回答できないのではないかと?) 被ばくリスクの観点から言えば、低レベル廃棄物の増加によるリスク増加についても記載するべき 廃棄物の被ばくリスク評価は、ロントエントからバックエンドまでのライフサイクルで考えるべき	伴	35	山名	山地 (代理で発言)か →項目35と同時対応、OECD/NEAの2002、2003年頃のレポート(原産協会訳あり)の更新版があれば参考になるのではない	電中研	36	伴	37	伴	アウツプ2でも良いが、回収ウランの取扱について記載すべき	スツツプ2で 対応 (電事連)	38	伴	政策評価に当たっては、核燃料サイクルの他国の現状についてもまとめておくべき →項目27と一緒に対応	田中	回収ウランの取扱は重要な視点 高レベルと低レベルの廃棄物を分けて整理する際に、総合的に管理しやすいという視点、総合的に見てどれが最適かという視点も重要	又吉	40	又吉	経済性についてはウラン価格の前提についても記載すべき →技術小委におけるウラン価格の燃料コストへの感度解析を利用	又吉	41
----	---------------	-------------	--	----	--	-----	-----	---	----	--	---	--------------------------------------	--------------	----	---	--	---	---	---	--	----	----	----	--	----	----	----	---	---	----	----	---	-----	----	---	----	---	------------------------------	-----------------------	----	---	--	----	--	----	----	----	---	----	----

番号	ご発言委員 (敬称略)	ご発言 (“→”は対応案)	アクション 担当
42	田中	ウラン価格だけではなく、ウラン資源を我が国が購入しやすいとか、国際競争、アジア地域での我が国の立ち位置という視点も重要 →エネルギーセキュリティの視点と解釈	ステップ2で 対応
43	伴	六ヶ所の現時点での成立性を踏まえて議論するために金子委員を呼んで話をしてもらうべき →検討小委では対応しない	対応不要
44	山名	日本原燃の経営の話を、政策を議論する場でするべきではない	対応不要
45	山地	評価軸整理(案)の『経済性』は、技術選択肢が複数の原子炉の組み合わせとして設定する場合があるので、経済性評価を再度実施する必要がある。このとき、再処理等の経済性は、原子力規模を想定する必要がある。	ステップ2で 対応
46	山地	政策選択肢の評価軸において、エネルギーセキュリティを評価軸に加えること	ステップ2で 対応
47	山地	政策選択肢の評価軸において、廃棄物・使用済燃料管理は、独立の評価軸とする費用は無く、他の評価軸の中で評価できる	ステップ2で 対応

1. 政策選択肢を議論する上での重要課題と、考えるべき選択肢

重要課題：エネルギーセキュリティ確保

これには地政学的な観点も必要

⇒

- ・将来の原発割合、廃炉と新增設計画
- ・中長期的観点でのウラン資源確保
- ・フロントエンド技術の維持
- ・燃料リサイクル（プルサーマル、高速増殖炉サイクル）

重要課題：国際貢献、産業の国際展開

⇒

- ・産業規模(プラント、サイクル)維持

重要課題：地球温暖化ガス対策

⇒

- ・原子力割合、廃炉、新增設
- ・高速増殖炉サイクル
- ・海外原子力への貢献

重要課題：政策の柔軟性、頑健性

⇒

- ・燃料備蓄、貯蔵、
- ・使用済燃料貯蔵
- ・回収プルトニウム貯蔵、利用
- ・回収ウラン貯蔵、利用

重要課題：将来のアジア地区多国間管理を見据えた、エネルギーセキュリティ、相互依存

⇒

- ・資源輸入、輸送、
- ・フロントエンド技術協力
- ・バックエンド協力

重要課題：回収プルトニウムの取扱(海外、国内)

⇒プルトニウムリサイクル

重要課題：核不拡散、核セキュリティ

⇒

- ・リサイクル
- ・回収プルトニウム利用
- ・直接処分 v s ガラス固化体処分

重要課題：放射性廃棄物管理、処分

⇒

- ・リサイクル
- ・将来原子力利用

重要課題：研究開発維持、人材育成維持

⇒

- ・高速増殖炉サイクル
- ・原割割合
- ・産業規模

2. その選択肢を評価する際の視点 (評価軸)

- ・産業への波及効果
- ・柔軟性、頑健性
- ・社会受容性
- ・核拡散・核セキュリティ
- ・廃棄物管理・処分
- ・燃料、使用済燃料管理
- ・政策変更課題

(これらは前回委員会に記載されているもの)

(付け加えて次のようなものが考えられる)

- ・エネルギーセキュリティ
- ・資源確保性
- ・将来原子力エネルギー利用変化への対応
- ・国際貢献
- ・研究開発
- ・人材育成維持
- ・地球温暖化ガス発生

3. 第一ステップの技術の評価表について

先回委員会資料（第一ステップでの評価軸整理(案)）についてのコメント

- ・技術の成熟度の視点を入れるべき（既に議論あったとおり）
- ・ライフサイクルでの被ばくリスクの部分：MOX燃料加工に伴う被ばくリスクのことは書かなくても良いか。安全確保の欄に記述があるので不要？
- ・資源利用効率の部分、プルサーマルの節約効果については現実的な値必要。20%は高すぎる？ 燃料貯蔵期間にもよるが
- ・核不拡散、テロ対策：アクチノイド燃焼の方法によって注意すべき核種が生成される場合があることに注意必要。

廃棄物発生量：ウンスルー以外のシナリオで、低レベル放射性廃棄物の物量が増加するが、その内容と量はシナリオによって異なる。アクチノイド燃焼シナリオの場合には分離に伴い発生する2次廃棄物や、核燃焼されないで残るMAの処理も重要。

意見書（技術等検討小委員会）

2012.1.31

伴英幸

依頼事項

（第2スレッズの議論のために）

1. 政策選択肢を議論するうえで、現在我が国が抱えている重要な課題は何か。その課題を克服するためにどのような選択肢を考えればよいか。

2. その選択肢を評価する際の視点（評価軸）はどのようなものが考えられるか。

1. 重要な課題は、政策が硬直化しており、柔軟な見直しが行えない構造にあることです。事務局がまとめる意見が恣意的であり、結論を誘導するような運営することが、政策選択肢を議論するうえで、障害となっていると感じています。加えて、利害関係者が非常に多い委員会構成になっている点も議論の障害になっていると考えています。

これを克服するためには、審議会の在り方を変える必要があります、ドイツの倫理委員会のような場を設定して議論することも一案だと思います。利害関係者は排除して、推進・批判双方の立場から大いに意見を聞きながら、審議を進めていくのが良いと考えます。利害関係者はオブザーバーとして大いに意見を言えばよいでしょう。

また、現実には根差した議論をしていない点も指摘できるでしょう。机上の空論が多すぎます。現実を踏まえた議論をすることが大事だと考えます。

2. 第6回技術等検討小委員会で提案されている評価軸に加えて、—その場でも意見を言いましたが—以下の点を加えたいと思います。その上で、現実を踏まえた評価が必要だと考えています。スレッズで行うとされている定量的評価も現実を踏まえて行う必要があると考えています。

- ① 核不拡散の中に、再処理・高速増殖炉計画が世界に与える影響
- ② フォススルー以外の選択肢ではプルトニウム需給バランス
- ③ 安全性の中に事故リスクを入れる
- ④ 事業の成立性

（すでに金子勝委員を招いて意見を聞くことを提案しました。一方からの意見だけでなく、日本原燃もしくは電事連の人本委員からも意見を聞けばよいでしょう。山名委員が金子さんの説明は粗い評価と言っていました。それが、それなら、その点を具体的に指摘をする人から意見を聞けばよいでしょう。）

加えて、再処理を断念した場合の事業費用と進んでいった場合の事業費用についても議論すべきです。とりわけ、東電が事実上破たんしている状況では、この問題は避けられないと考えます。(高レベルは国が前面に、再処理は事業者任せは無責任)

⑤ 先に、再処理についても総合評価を今の時点で行うべきと、意見書で訴えましたが、この点も欠かせません。技術選択肢に付随する問題として評価に加えてください。

⑥ 選択肢の代替案として、いつそう現実的なものを考慮、議論する。

⑦ 社会的受容性

⑧ 政策変更に伴う諸問題

—新大綱策定会議で少し議論になりましたが、再処理を止めれば使用済み燃料が地元に戻る—これが唯一の選択肢とは考えられません。あるいは戻るとして、どう対応するべきかなど議論すべきことはあると考えています。

とりあえず、気づいた点です。

<第2ステップの議論に向けて>

我が国が抱える重要な課題

課題克服のために必要な選択肢

選択肢を評価する際の評価軸

エネルギー・選択肢の確保

* 化石燃料・ウラン燃料の供給量および価格の決定イニシアティブは、資源保有国にある。これら資源をリーズナブルな価格で安定的に確保するためには、潜在的な「代替オプション」を持ち続けることで資源の買い手としての交渉優位性を保つ必要がある。

* ウラン燃料使用量低減による、広義の自給率向上が必要。
将来的な高速増殖炉への移行を視野にいったん選択肢を残すことも重要に。

より広範囲の選択肢を持ち続けることが重要

エネルギー安定確保(資源有効利用)
選択肢の柔軟性

エネルギーの安定確保

* 資源に乏しく、エネルギー多消費国である日本には、エネルギー源を安定的に確保するための戦略が必要。100年単位の超長期のエネルギー源の確保という視点も重要に。

* 日本の産業政策や国際貢献の在り方を視野に入れた選択肢も重要に。

FBR

経済性・産業への波及効果
人材育成
国際貢献
技術開発力の維持・向上

成長産業の育成と雇用機会の確保

* 海外原子力プロジェクトの進展に伴い、原子力インフラ産業は日本の輸出産業の柱のひとつとなる可能性を秘めている。メーカー・技術者の育成と技術者の雇用機会の維持拡大が必要に。

* 研究開発・技術者の離散回避。

国際貢献の充実

* 非核兵器国の原子力利用の模範である日本が保有する原子力発電技術や高速増殖炉技術が、世界の原子力平和利用をリードする役割を期待されている。

LWR-FR

人材育成
技術開発力の維持・向上

戦略的な研究開発分野の取捨選択

* 研究開発予算は無限ではない。現在および50～100年後に想定される技術成熟度、研究開発における自国の先進性を考慮し、限られた予算で世界をリードできるような技術開発成果を出せる研究分野の取捨選択、およびリソースの集中も必要に。

* 技術と技術を繋ぐものはやはり技術。研究開発分野の取捨選択は、慎重に実施する必要も。

LWR-MOX
リサイクル

廃棄物
環境負荷低減(環境適合性)

放射性廃棄物の管理・処分

* 放射性廃棄物を適切に管理し処分すること、処分により環境へ与える負荷を低減することが重要。

公約の遵守

* サイクル事業については、関連施設受入立地行政、および諸外国と燃料リサイクルに関する何らかの「公約」が結ばれている。その公約に対するコミットメントの揺らぎは許容されにくい。

* 核不拡散に対する国としてのコミットメントが必要に。

LWR-MOX限定
リサイクル

政策変更による課題
社会受容性:立地地域との信頼関係の維持
核不拡散

軽水炉の運転停止リスクの回避

* サイクル事業の政策が大幅に変更される場合、現在六ヶ所再処理施設に貯蔵されている使用済み燃料や海外に貯蔵されている廃棄物が行き場を失う可能性も。

* 再処理工場への搬出が前提とされている中間貯蔵施設の建設継続が困難となる可能性も。

* 使用済み燃料が六ヶ所再処理施設から返還されたり六ヶ所への搬出が停止された場合、各発電サイト内にある使用済み燃料プールが満杯となり、軽水炉における発電を中止せざるを得なくなる可能性も。

* 使用済み燃料に「将来再利用される資源」としての価値があると定義され続ける選択肢が必要に。

LWR
フンス
スルー

社会受容性:使用済み燃料が広義の国益(国民生活)のために重要な資源であるという合意形成。
政策変更による課題

政策変更コスト(ストランデットコスト)発生回避

* 六ヶ所再処理施設内の第一再処理工場はほぼ建設完了。再処理事業が商業化されない場合には、これまでの投資資金が未回収となるリスク(ストランデット・リスク)が顕在化する。

政策変更による課題
発電コスト(経済性)への波及影響

減原子力政策が推進される場合の、燃料サイクルによるメリット低下

* 減原子力政策が推進される場合、再処理事業による資源節約性メリットが縮小する。

* 将来の日本の原子力発電量をベースとした、核燃料サイクル事業のブレイク・イーブン・ポイントを見極めた事業計画の修正も必要に。

発電コスト(経済性)への波及影響

困難な核燃料サイクル関連施設の建設立地

* 国内でまだ商業化の途中にある核燃料サイクル技術に対する理解度の低さ、事業者や政府に対する信頼感の揺らぎもあり、核燃料サイクル関連施設の建設立地が困難に。

社会受容性
政策変更による課題

又吉 委員

核燃料サイクルのシナリオ選択 (政策選択)についての意見

京都大学原子炉実験所
山名 元

1

バックエンドシナリオに関わる議論の前に

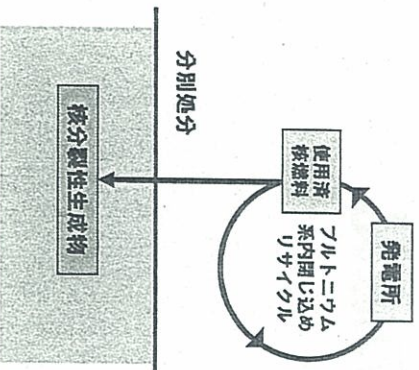
1. バックエンド計画は、3つのオプションのトレードオフの議論である事。再処理リサイクル路線を否定する場合、その代替路線の現実的な提案が必要。
2. バックエンド計画の策定においては、「高レベル放射性廃棄物のマネージメント」と「資源物質の利用」の二つの視点が重要であること。
3. 放射性廃棄物管理体系全体の最適化の視点が重要であること。
4. 使用済燃料の資源価値については、一次フイットサイル資源(天然ウラン)に対する、二次フイットサイル資源としての価値の評価が必要。
5. 最終展望のない長期貯蔵については、能動的な管理に長期的に依存する事の妥当性や、その社会的な認知が不可欠。
6. バックエンド戦略を実現するには、立地問題等、事業に関わる認識共有や理解等、長い時間をかけた準備が必要であること。構築してきた地元了解やインフラの価値への認識は前提。
7. 原子力だけでなく、我が国の将来のエネルギー展望に関しては、中長期的な不確実性が存在する。将来不確実性に対するロバストな姿勢が必要。原子力の利用や核燃料サイクル事業は、この将来不確実性の中での位置付けとして考えるべき。
8. 諸外国におけるバックエンド路線の選択については、資源戦略的な国情や今までの投資の状況、経済性に対する見方等、様々な視点がある。冷静に分析が必要。一般的に、コスト(投資)と資源展望のバランスの判断や、貯蔵や放射性廃棄物管理のバランスで、考える事が多いのでは。

2

バックエンドのオプション

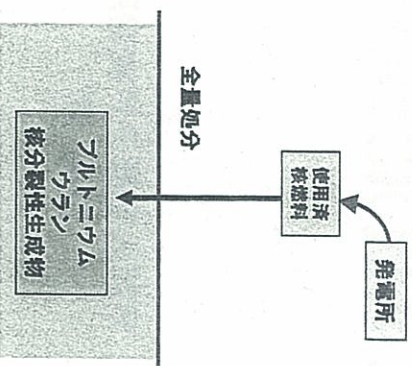
- ▶ 発電所内での大量に使用済燃料を保管：原子炉に大量のハザードを保管する事になり、あまり好ましくない。
- ▶ 福島事故により、原子炉安全と同様に考えられがちであるが、発電所の在り方によらず、いずれかのオプションを選択しなければならない。

再処理路線 (核燃料サイクル)



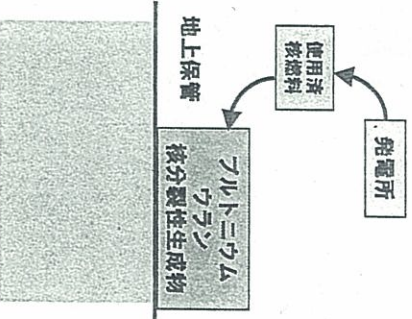
- ▶ プルトニウムを地層処分せず、燃料として再利用する(プルサーマル)。将来的に高速炉架けるとベスト。
- ▶ これにより、放射性廃棄物の減容と、資源の有効利用を行う。
- ▶ フランス、日本、ロシア、中国、インドなど。将来的には韓国が指向している。

直接処分路線 (直接処分サイクル)



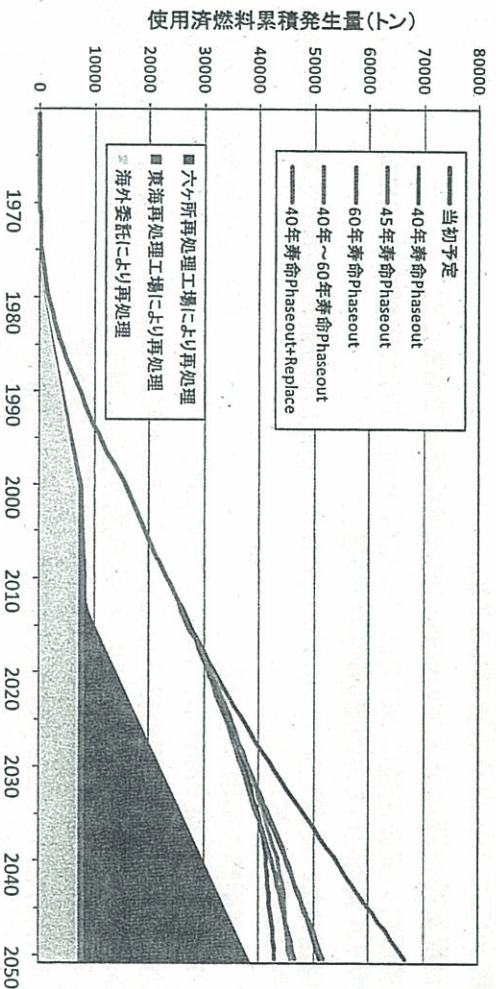
- ▶ プルトニウムを含めて、使用済燃料を地層処分。
- ▶ プルトニウムを貯蔵(中間貯蔵)が大きくなると共に、放射性廃棄物の処分面積が大きく、毒性が長く続く。
- ▶ 原子力小規模国のフレンチやスウェーデン、ウラン資源国のカナダが採用。

長期貯蔵路線 (将来へ先送り)



- ▶ プルトニウムを含めて、使用済燃料を地上施設に長期保管。
- ▶ 使用済核燃料貯蔵量が大きくなると共に、地上でのハザードが継続。能動的管理の必要性が継続。次世代への責任先送りとなる。
- ▶ 貯蔵終了後の対策(処分や再処理)をある程度展望するべき。

使用済燃料累積発生量のシナリオ比較 (山名試算)



バックエンド戦略に関わる条件など

高放射性物質としての管理の在り方

使用済燃料長期管 の妥当性	長期貯蔵の安全性 世代間責任 貯蔵施設立地の実現性
地層処分 の合理性	処分場面積 処分場設計とコスト 長期安全性 潜在毒性継続 発熱密度 廃棄体の品質管理 長半減期高毒性核種の生成量 核変換等への展開可能性
放射性核種の蓄積	

フイットサイル資源の管理の在り方

二次フイットサイル資 源の利用の価値	天然ウラン可採量 天然ウラン価格・鉱山開発・投機等 天然ウラン産出国環境問題 天然ウラン獲得競争 Pu-241の損耗 天然ウラン節約効果 回収ウラン再濃縮のコスト妥当性 海水ウラン利用の実現性 核物質転用抵抗性 保障措置の実効性 核拡散抵抗性
核物質管理	

コスト	安全性 技術継承性 必要条件・周辺 条件・外部因子
安全確保	国際外交・国際圧力等 社会的受容性

国情・理念
戦略・判断

核燃料サイクル
政策と戦略

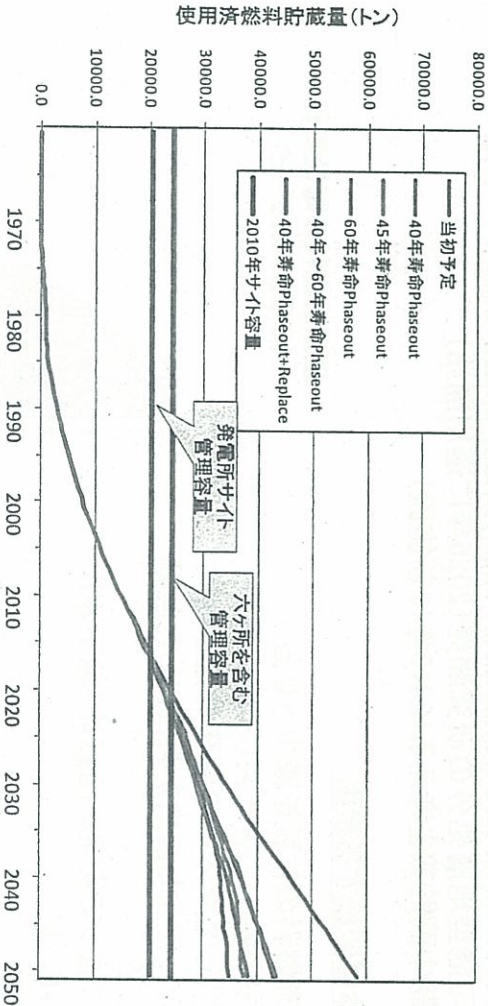
従来政策からの
無理ない移行

福島事故による原子力
エネルギー政策見直し

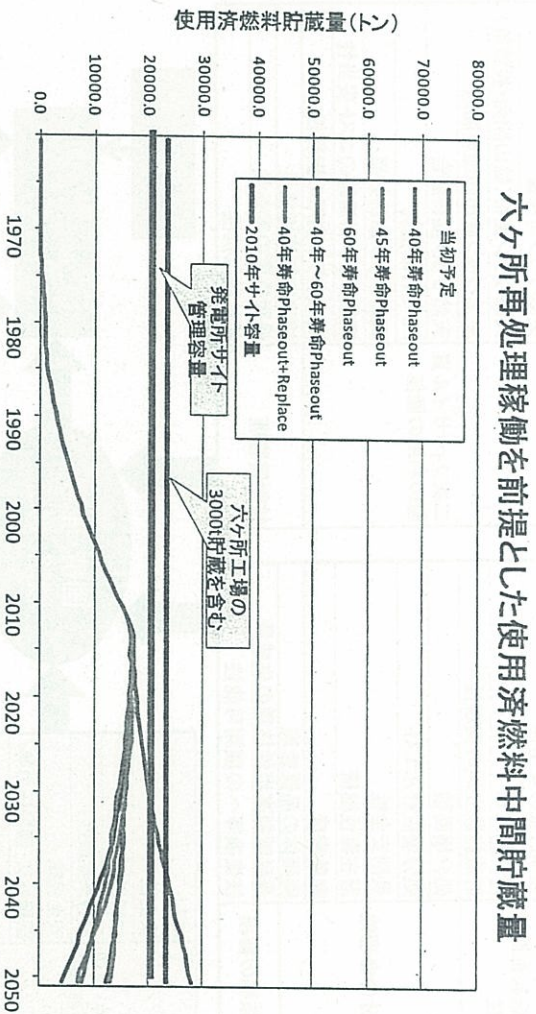
1. 原子力発電長期計画(規模・時期)
2. 発電所サイトでの使用済燃料保管量
3. 使用済燃料の中間貯蔵量
4. フルトニウムの保管量(余剰分の削減)
5. MOX軽水炉利用の進捗
6. 地層処分の進捗

使用済燃料の中間貯蔵量(山名試算)
(再処理しない場合)

再処理しない場合の使用済燃料中間貯蔵量



使用済燃料の中間貯蔵量（山名試算） （六ヶ所再処理工場の稼働を前提）



7

高放射性廃棄物管理としての考え方

フランスの廃棄物法での選択肢)

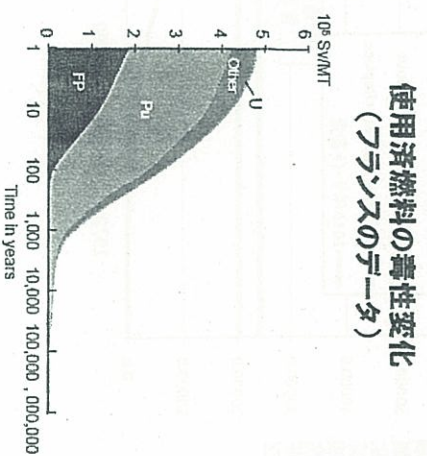
1. 放射性廃棄物最小化（分離変換） 路線：高速炉原型炉2020年に予定
2. 回収可能型地層処分の研究開発（2025年に運用開始）
3. 超長期中間貯蔵を考える（2015年に新施設）

ガラス固化体に変換する理由

1. 使用済燃料の体積を減少させる
2. 廃棄体の熱出力を低減（早期の処分）
3. 地層処分廃棄体中の潜在毒性を削減
4. 品質を一定化し素性を明白にした廃棄体にする
5. 長期に亘って安定な廃棄体（地下水に溶解しにくい）

使用済燃料としての管理

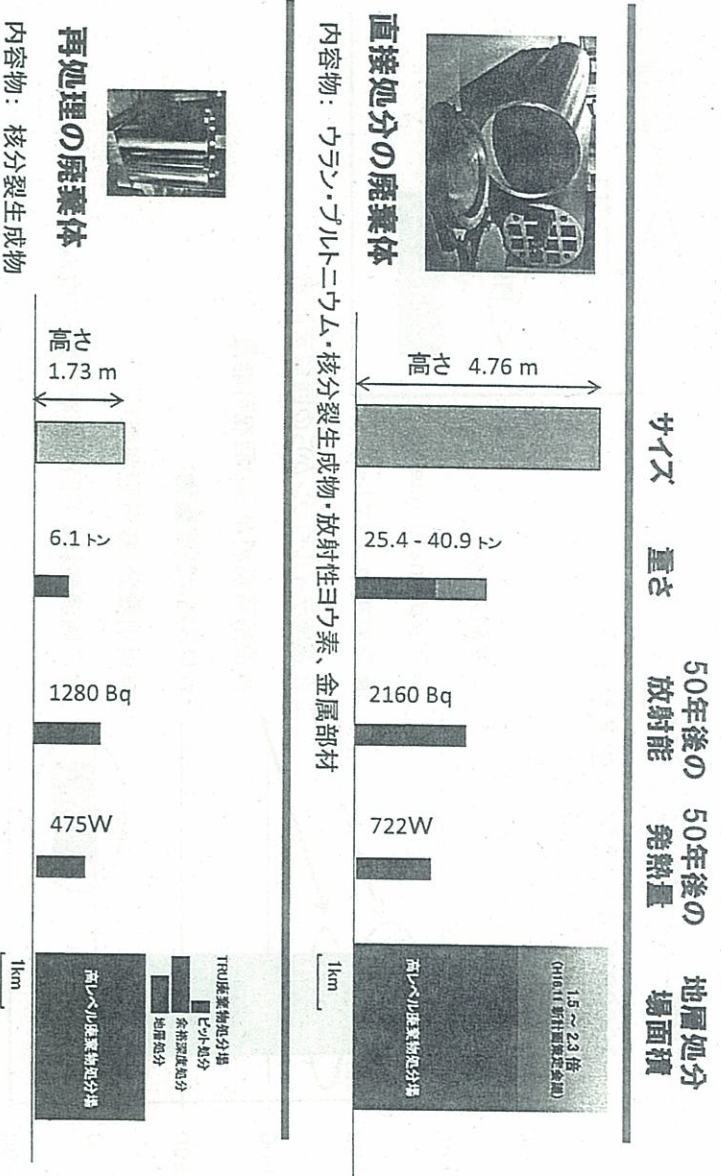
1. 7体の使用済ウラン燃料を、1体のMOX燃料にして、当面保管。



8

廃棄体の比較（再処理と直接処分）

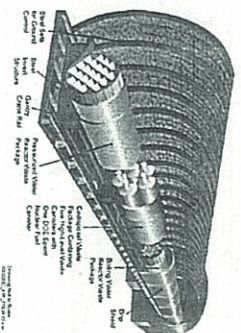
➤ 直接処分では「使用済燃料そのもの」が「高放射性廃棄物」となる。再処理リサイクル路線では、資源物質であるウランとプルトニウムは回収して使うので、「核分裂生成物だけが「高放射性廃棄物」となる。



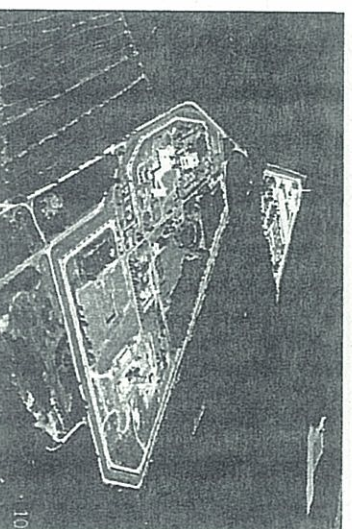
直接処分場概念 Yuccaマウンテン（米国）とGorleben（独）

- ◆ 米国・ドイツとも、直接処分事業は実施に至っていない。現在は、両国ともサイト内貯蔵で対処
- ◆ 両計画とも、廃止ないし中断状況にある。
- ◆ 直接処分の実施は、立地問題やサイト選定を含めて、決して楽ではない。

米国の直接処分場計画 Yucca Mountain, NEVADA, USA



ドイツの使用済燃料直接処分計画 Gorleben

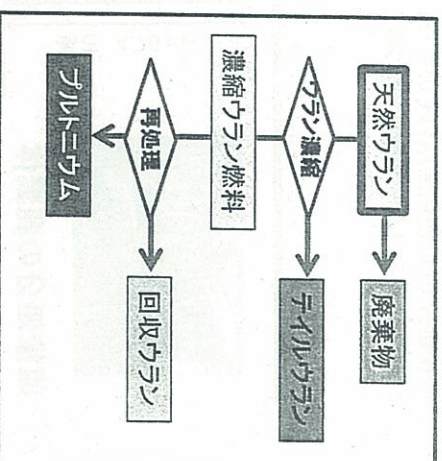
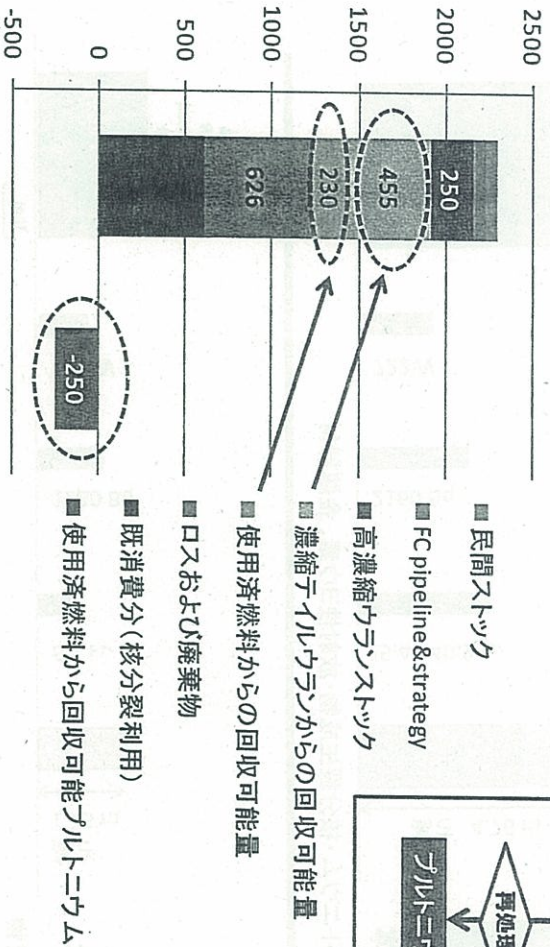


U-235換算で見る核分裂性物質二次資源の価値

U-235: 自然界にわずかに存在する貴重な核分裂性資源。どの程度有効利用されているか

核分裂性資源二次ソースの価値を考える

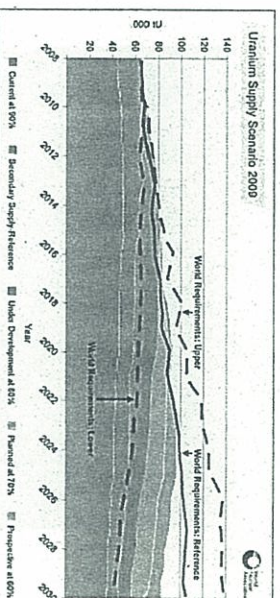
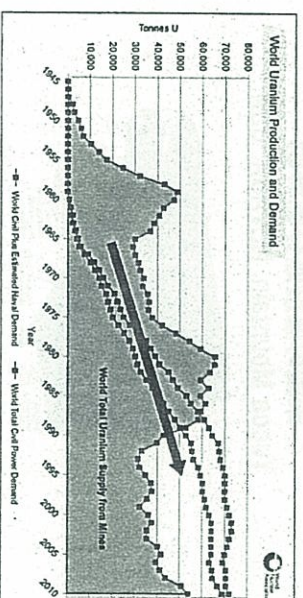
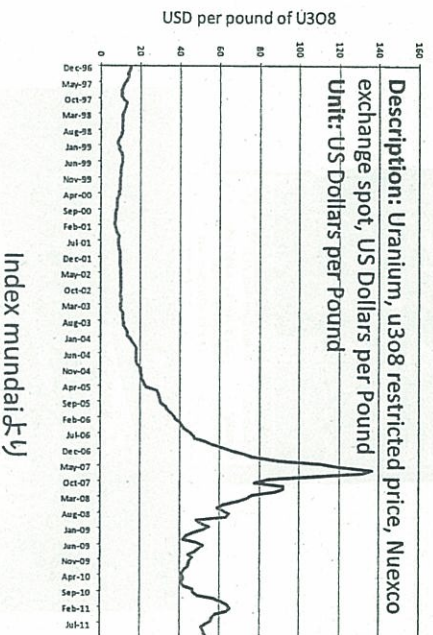
2000年時点累積ウラン生産量(kt)
(U-235換算)



11

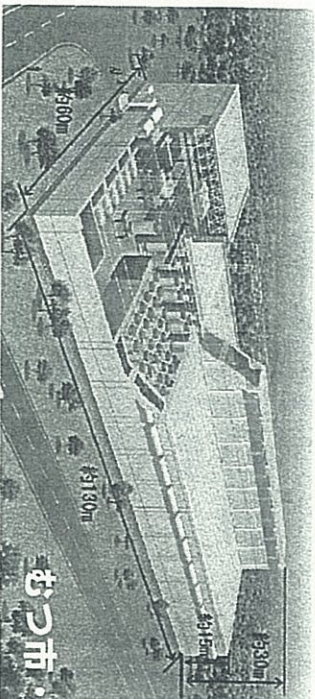
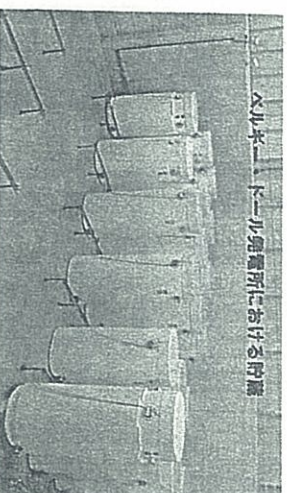
ウラン資源価格の変動 (将来の価格に大きな不確定性)

福島事故以降も、世界の95%は原子力利用拡大の方向(米国や英国では市民意識も原子力肯定)世界的な原子力拡大傾向は続く→世界的なウラン需要は拡大に向かう
我が国が、原子力利用を一定規模で継続するのであれば(審議中)、核燃料確保に関わる不確定な状況は続く。

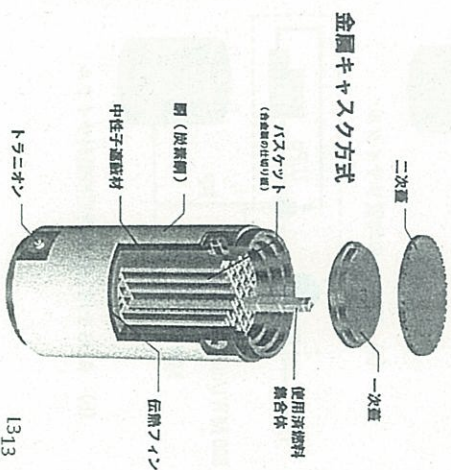


中間貯蔵施設（直接処分では数多くの貯蔵施設が必要）

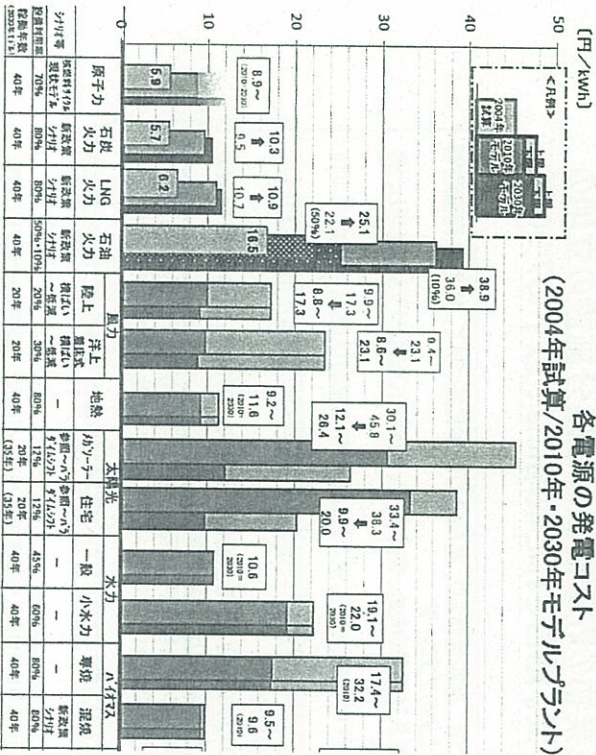
年度	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	50年後
原子力 燃料調整 （燃料費） （燃料費） （燃料費）	計画可算	V 燃料	計画可算	V 燃料	計画可算	計画可算	計画可算	計画可算	V 燃料
原子力 安全 委員会	V 安全 委員会	V 安全 委員会	計画可算	V 安全 委員会	計画可算	計画可算	計画可算	計画可算	V 安全 委員会
中部電力 使用済 燃料乾式 貯蔵施設	計画可算	計画可算	計画可算	計画可算	計画可算	計画可算	計画可算	計画可算	V 計画可算



リサイクル燃料貯蔵株式会社（東電及び日本原電で共同設立）によるサイ
ト外の金属キャスク乾式貯蔵（平成22年8月27日認可、8月31日着工）

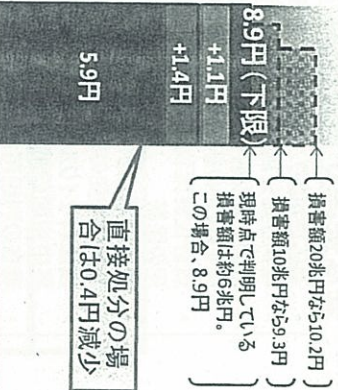


各電源のコスト比較（コスト等検討小委員会結論）



「減原子力＋火力＋再生可能エネルギー」
全体システムでの経済合理性を考える

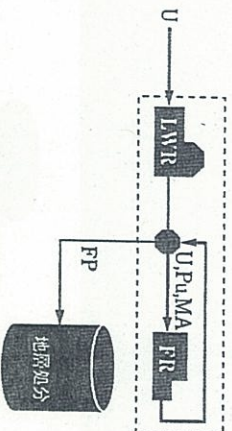
原子力発電コスト



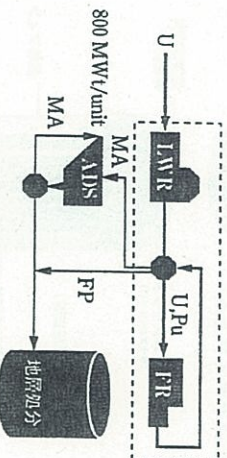
今回試算
F数40年、設備利用率70%（実績ベース）、割引率3%

核種分離変換技術の開発（技術ポテンシャルは軽視しない）

2つの分離変換システム概念



(a) FBRへの均質リサイクル

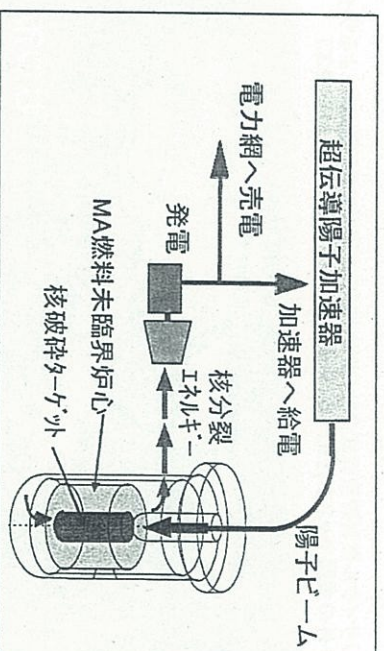


(b) ADSを用いた階層型核燃料サイクル

分離変換の意義：

- (1) 潜在的有害度の低減
 - (2) 地層処分場に対する要求の軽減
 - (3) 廃棄物処分体系の設計における自由度の増大
- MAの分離変換と発熱性FPの分離技術により、種々の廃棄物処分方法の組み合わせで構成される「廃棄物処分体系」をより合理的なものであるとして設計する自由度が増大する可能性があるという観点が重要である。

加速駆動未臨界炉によるMA核変換システム概念



米国ブルーリボン委員会

BRCの結論の着目点は、「貯蔵＋処分」に対する首尾一貫した法制度と組織体制が必要であること。米国としてはサイクル路線選択の判断は今では出来ないが、技術開発の継続が重要と指摘している事。

核燃料サイクルのバリエーションの管理に関して、新たに包括的な戦略が必要であり、特に放射性廃棄物の貯蔵施設及び処分施設の立地のための新たなアプローチが必要。勧告された戦略には、以下の7つの重要な要素が含まれる。

- ・ 適応性があり、段階的で、同意に基づき、透明性があり、基準及び科学に基づいて、放射性廃棄物管理及び処分施設を立地し、開発するためのアプローチ
- ・ 米国での放射性廃棄物の輸送、貯蔵及び処分のため、統合されたプログラムを開発し、実施するための新しい、単一目的の組織
- ・ 放射性廃棄物管理プログラムによる、放射性廃棄物基金の残高と毎年の放射性廃棄物提出金の利用の保証
- ・ 使用済燃料及び高レベル放射性廃棄物の安全な処分のための1つまたは複数の恒久的な地層処分施設の開発のための、可能な限り迅速な取組
- ・ 核燃料サイクルのバリエーションの管理のための統合された包括的な計画の一部として、1つまたは複数の集中中間貯蔵施設の開発のための、可能な限り迅速な取組
- ・ 現在の利用可能な技術に比較してかなりの利点を提供しうる先進的な原子炉及び核燃料サイクル技術に関する研究開発・実証とそれに関連した人的・二重及びスキル開発のための安定した長期的なサポート
- ・ 地球規模の核不拡散に対応し、全世界の原子力施設及び核物質の安全性及びセキュリティを向上させるための国際的なリーダーシップ

内は原子力環境整備標準・資金管理センターHPより引用。一部内閣府で修正して掲載。

今後の議論の参考として（視点など）

1. 「感情的なサイクル忌避論」や「観念的なサイクル必要論」ではなく、冷静な分析と判断による「戦略的バックエント計画」の再考が重要
2. コストだけでなく、資源保障、高レベル処分合理化、立地、対応の柔軟性、既存インフラとの整合や投資済施設の有効利用、等、多様な側面からの判断が重要
3. 先ずは、原子力発電電展望を明白にする事が必要(将来的な原子力利用計画が定まらないと、燃料物質のフローの想定が出来ない)
4. 将来の天然ウラン入手の不確定性(価格上昇等)に対する見解が必要。サイクル議論において、資源保障は重要な因子
5. 再処理・中間貯蔵の両者をバランスした視点が重要(路線の如何に関わらず、中間貯蔵施設の建設を急ぐべき)
6. 再処理路線においては、フルサークルの規模と実施期間の、具体化が必要。再処理フルサークルの後に続く展望の設定や想定が必要。
7. 使用済MOX燃料の処置の具体化(高速炉利用を想定する場合は、高速炉実用化の具体的計画が必要)が必要。修正オーブンサイクル等の可能性も否定はしない。
8. 高速炉開発については、開発の柔軟性を重視しつつ、技術の継承と発展が重要。長寿命核種の変換処理は、高速炉の重要な意義の一つ
9. 使用済燃料の直接処分が、将来的に可能であるか具体的判断が必要(中間貯蔵施設、直接処分の受け入れ地選定、プルトニウム埋設の妥当性他)。現時点で判断できるのか？
10. 使用済燃料の長期貯蔵が、現実的に可能か具体的な判断が必要
11. 国際的な燃料サイクル動向(仏、ロシア、インド、中国、米国、韓国等)についての注視が必要

核燃料サイクルの技術選択肢 及び評価軸について（改訂版）

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2月16日

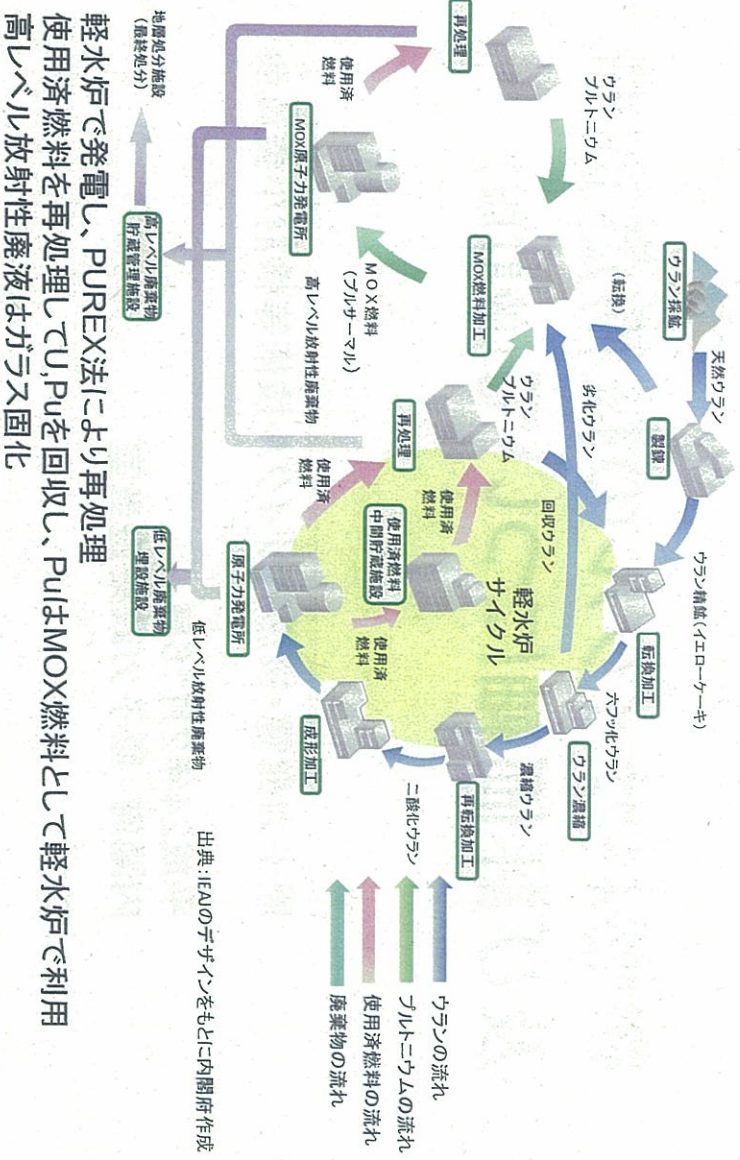
内閣府 原子力政策担当室

第1ステップ議論の目的

—政策選択肢の議論をする前に—

- 第2ステップにて政策選択肢の議論をするうえで、必要と思われる「技術の特性」について、最新情報の共有と理解を深めること。
- 現在我が国が進めている核燃料サイクル・高速増殖炉路線に加え、検討するにふさわしい代替サイクル路線（技術選択肢）を整理すること。
- 不確実性が高い炉型やサイクル技術については、将来の検討に資するよう情報の整理を行うこと。
- 既存路線と代替路線について、それらの得失について整理し、その評価の視点（評価軸）を整理すること。
- 以上について合意できる点、そうでない点を整理すること。

現状の燃料サイクル(LWR-MOXリサイクル)



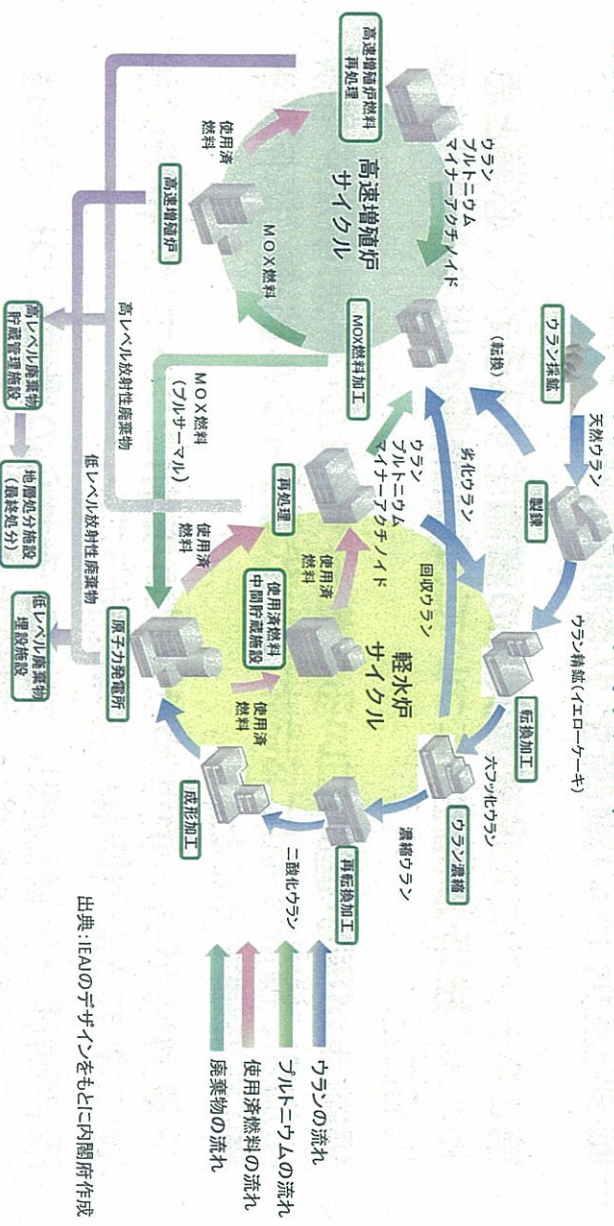
2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

3

現大綱で目指す燃料サイクル(FBR)

(現行のLWR-MOXリサイクルからFBRサイクルへ)



軽水炉を順次高速増殖炉で代替

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

4

現在提案されている主な革新的炉概念の例

- Generation IV International Forum (GIF) -

システム	中性子スペクトル	想定サイクル	炉出力 (MWe)	応用分野	R&Dニーズ
超高温ガス炉 (VHTR)	熱	オープン	250～300	発電・水素製造・熱利用	燃料・材料・水素製造
超臨界水炉 (SCWR)	熱・高速	オープン (クローズ)	300～700 1000～1500	発電	材料 熱流動
ガス冷却炉 (GFR)	高速	クローズ	1200	発電・水素製造・アクリノイド燃焼	燃料・材料・熱流動
鉛冷却炉 (LFR)	高速	クローズ	20～180 300～1200 600～1000	発電・水素製造	燃料・材料
Na冷却炉 (SFR)	高速	クローズ	50～150 300～1500 600-1500	発電・アクリノイド燃焼	先進リサイクル・燃料
溶融塩炉 (MSR)	熱・高速	クローズ	1000	発電・水素製造・アクリノイド燃焼	燃料取扱・材料・信頼性

出典: A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, 2010 GIF Annual Report より事務局にて作成

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

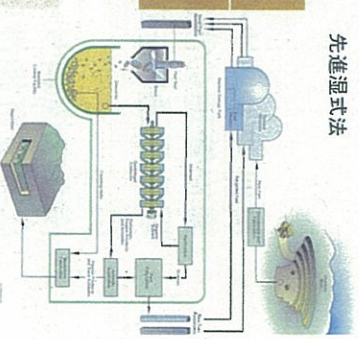
5

GIFで想定した燃料サイクル概念の例

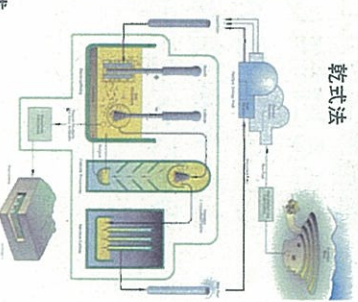
- GIF 燃料サイクル概念 -

システム	燃料				リサイクル	
	酸化物	金属	窒化物	炭化物	先進湿式	乾式
超高温ガス炉 (VHTR)	P				S	S
超臨界水炉 (SCWR)	P				P	
ガス冷却炉 (GFR)			S	P	P	P
鉛冷却炉 (LFR)		S	P		P	P
Na冷却炉 (SFR)	P	P			P	P
溶融塩炉 (MSR)	—	—	—	—	—	—

先進湿式法



乾式法



P:第一候補 S:第二候補

出典: A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems (2002) より事務局にて作成

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

6

米Blue Ribbon委員会で検討された燃料サイクル概念

サイクル	定義
ونسスルーLWR	革新的な改良を施した軽水炉(LWR)によりウラン酸化物燃料を燃焼
ونسスルーHTR	例えば黒鉛母材燃料を使用する冷却材温度600℃超の高温ガス炉(HTR)によるونسスルーサイクル。米エネルギー省の次世代原子力プラントプロジェクトとして検討中
修正オープンLWR サイクル	革新的な改良を施したLWRによりウラン酸化物・混合酸化物燃料を燃焼。MOX燃料は一度だけ照射して直接処分

クローズFBR
サイクル

アクトノイドを連続的にリサイクル可能な液体金属冷却高速増殖炉

※MIT報告では、上記4項目のうちونسスルーHTRを除く3項目を検討

出典：Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future Draft Report to the Secretary of Energyより事務局にて作成

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

7

米ブルーリボン委員会の結論

- 再処理やリサイクル技術の進展を勘案しても、今後数十年で、放射性廃棄物管理の課題を本質的に変えうる潜在力を有した、実現可能な合理的見通しを立てうる原子炉及び燃料サイクル技術は、見当たらなかった
- 様々な燃料サイクルとテクノロジー・オプションのメリットならびに商業的な実現可能性についての大きな不確実性を鑑み、米国にとって、特定の燃料サイクルに現時点で政策として不可逆的に関与することは時期尚早であると結論した
- むしろ、不確かな将来に直面した際、より効果的に環境変化に適応しうるよう、放射性廃棄物管理プログラムと大きな原子力エネルギー・システムのアプションを保持して開発を続けることが重要である

出典：BRC Report to the Secretary of Energy - January 2012

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

8

OECD/NEAで検討された燃料サイクル

■ ウンスルーサイクル

- 燃料を一度だけ利用して処分

■ 部分リサイクルオプシジョン

- 使用済燃料を再処理し、未使用のウランとプルトニウムを回収してリサイクル
- 使用済燃料や廃棄物の物量を減らすとともに天然ウランの所要量が低減

■ 高速炉利用

- 効率的な燃料の利用のため、核燃料物質及び非核分裂物質を多重リサイクル

■ 完全クローズサイクル

- 全てのアクチノイドが核分裂するまで継続的にリサイクルされる
- 再処理時のロスのみが廃棄物に回るため、アクチノイドプリー廃棄物に近くなる

同報告では、サイクルのトレンドのレビューが行われており、最適サイクルの選定は実施していない

出典：Trends towards Sustainability in the Nuclear Fuel Cycle (OECD/NEA, 2011)

2012/2/16

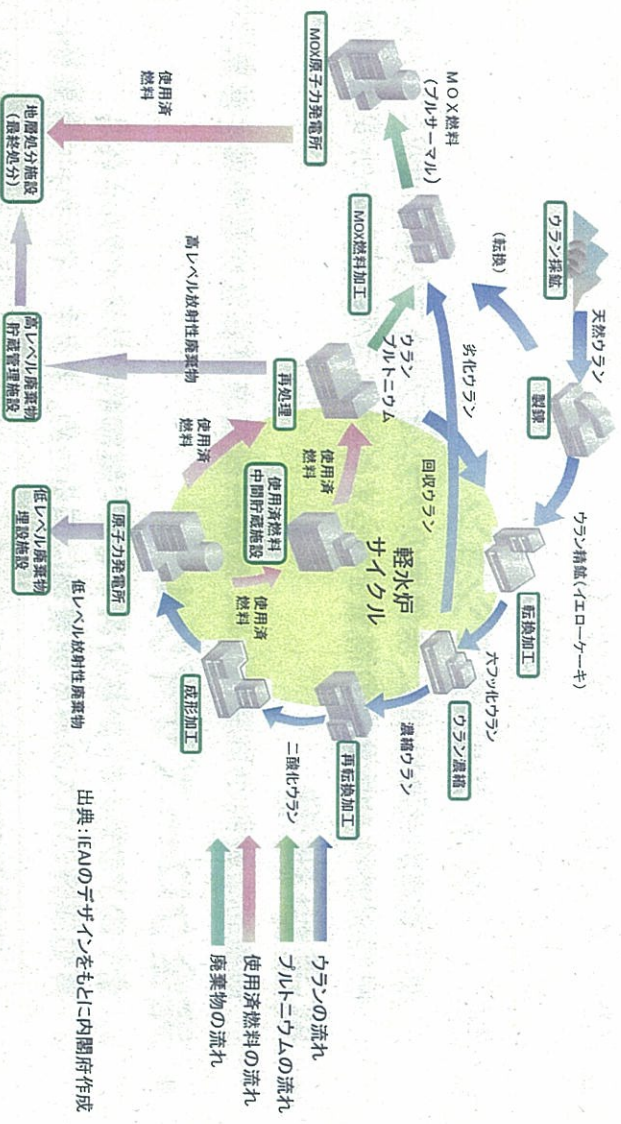
原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

9

選択肢の例

軽水炉	再処理	高速炉		選択肢
		アクチノイド燃焼	燃料増殖	
○	○ (全量)			LWR-MOXリサイクル
○	○ (ウラン燃料のみ)			LWR-MOX限定リサイクル
○	○	○		LWR-FR(アクチノイド燃焼)
○	○	○	○	FBR
○				LWRウンスルー

LWR-MOX 限定サイクル



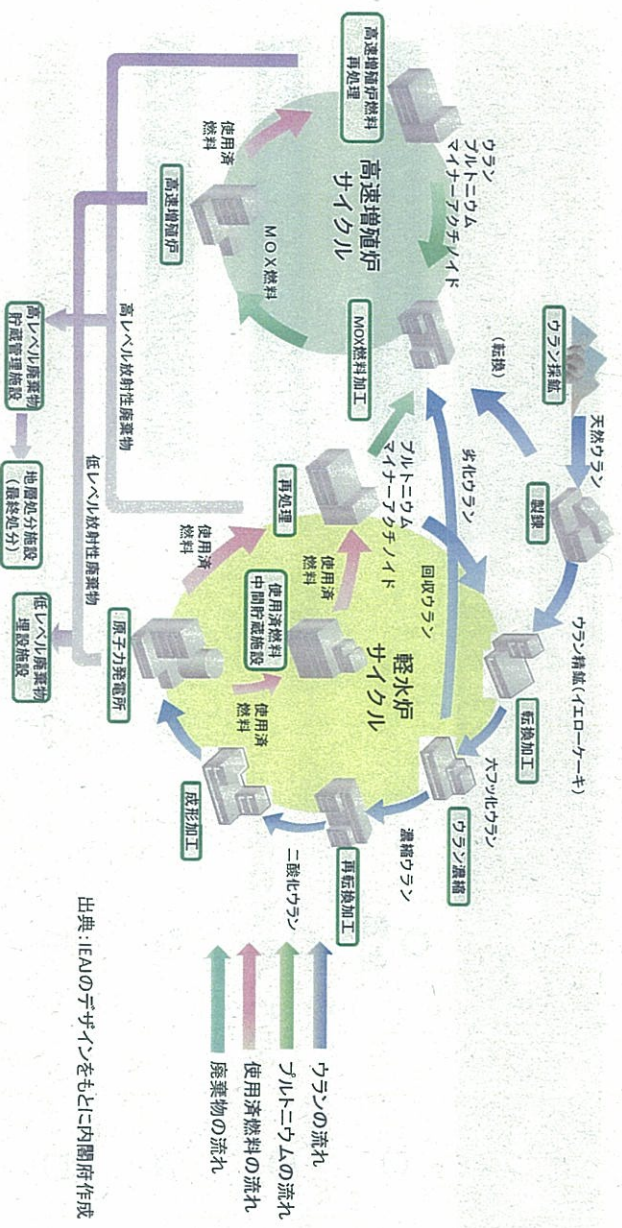
再処理からのPuを軽水炉で1回燃焼し、Puの有効利用を図る
Pu利用の代替オプション(例):トリウム+Pu燃料、海水ウラン捕集、新型転換炉 など

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

11

FBR(LWRからの移行期)



軽水炉を順次高速増殖炉で代替し、資源節約・環境負荷低減等を目指す

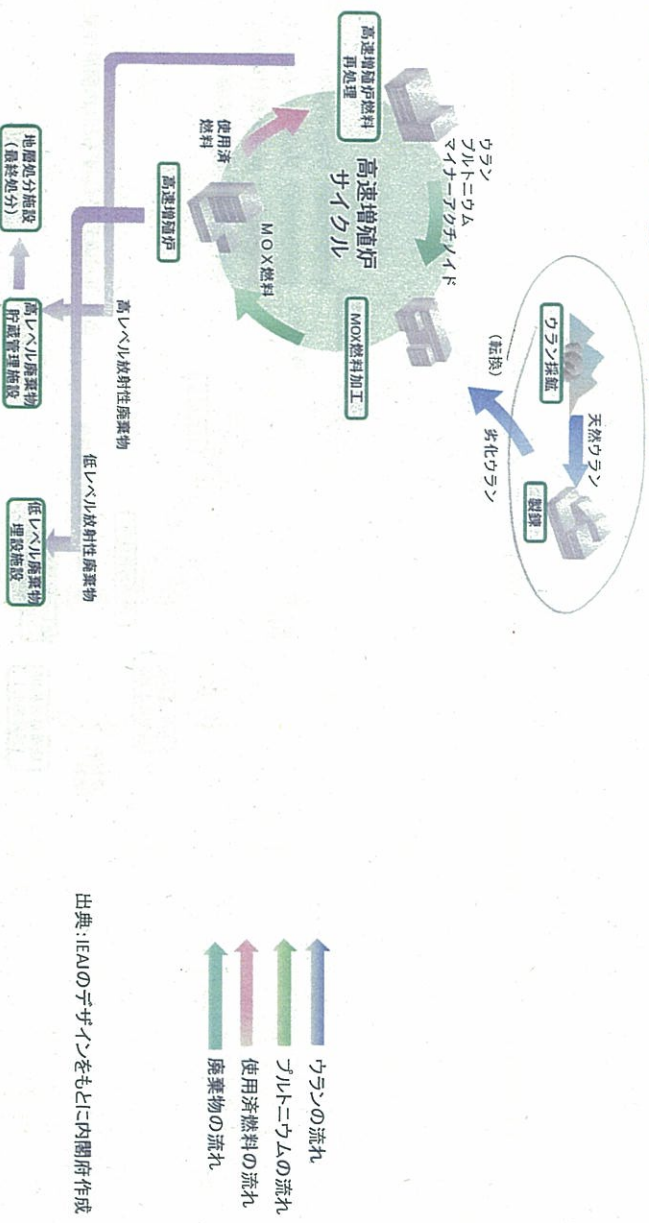
EBR代替オプション(例):トリウム炉、海水ウラン捕集、長寿命炉 など

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

12

FBR (移行後)



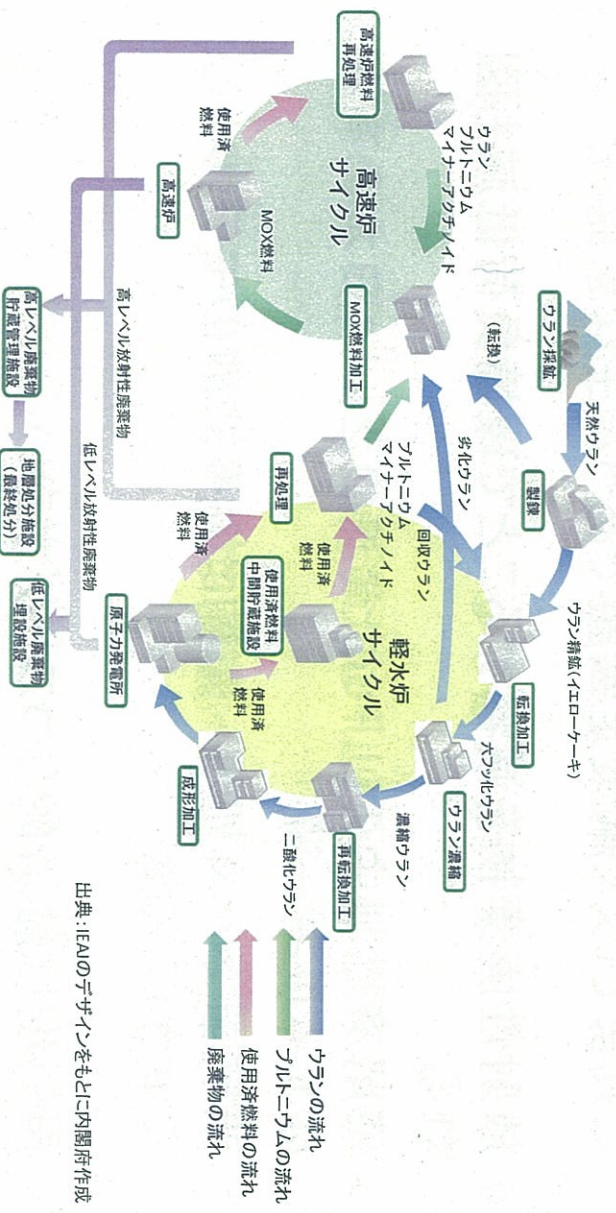
- 軽水炉を順次高速増殖炉で代替し、資源節約・環境負荷低減等を目指す
- FBR代替オプション(例): トリウム炉、海水ウラン捕集、長寿命炉 など

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会 (第7回)

13

LWR-FR (アクチノイド燃焼)



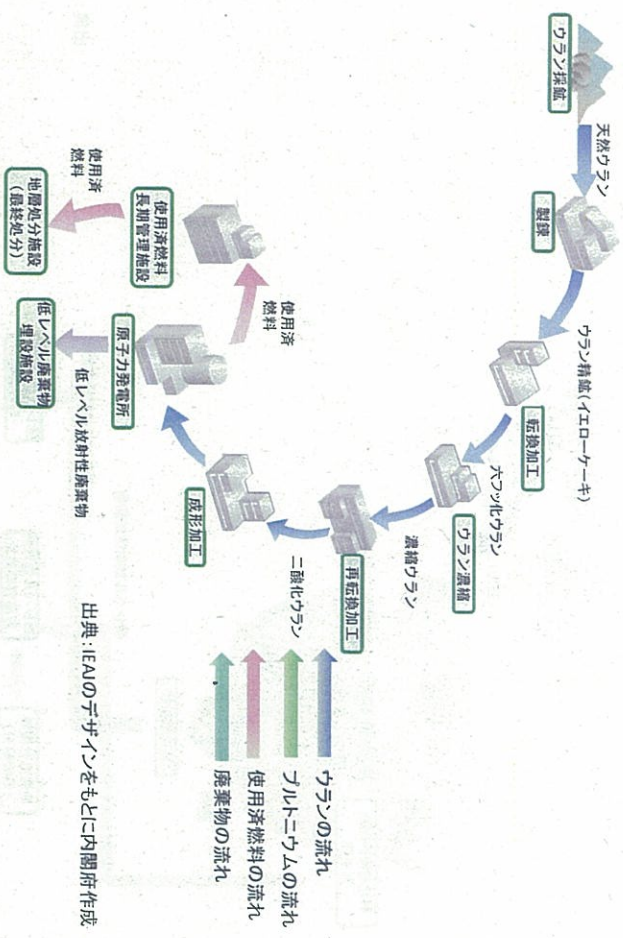
- FR (アクチノイド燃焼炉) を導入し、環境負荷低減等を図るオプション
- FR の代替オプション (例): 加速器駆動システム、新型転換炉 など

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会 (第7回)

14

LWRウンスルー



使用済燃料は(長期管理を経て)直接処分
軽水炉の代替オプシヨン(例): 海水ウラン捕集、長寿命炉 など

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

15

再処理・燃料サイクルの得失

ーこれまでの大綱策定会議であつた主な意見ー

- 放射性廃棄物を減容することで環境負荷低減も図れる
- 使用済燃料中のU,Puは資源の乏しい日本の有用なエネルギー源
- 非核国での再処理・濃縮は核不拡散のモデルとして世界に貢献

- × 再処理は経済的なコストが大きい
- × もんじゅは15年も運転停止であつたし、再稼働後もトラブルを起こしている

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

16

技術選択肢の評価軸(案)

ーステツプ1の評価軸ー

- 安全性
 - 安全の確保、ライフサイクルでの被ばくリスク など
- 経済性
 - 発電コスト など
- 資源有効利用
 - 資源利用効率、資源量 など
- 核不拡散・セキュリティ
 - 不拡散、テロ対策 など
- 廃棄物
 - 高レベル放射性廃棄物の潜在的有害度・発生量・処分面積・被ばくリスク など

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

17

安全性：安全の確保

LWRフランスルー

LWR、使用済燃料長期管理施設、地層処分場のさらなる安全向上が課題

LWR-MOX限定リサイクル

LWR-MOXリサイクル

LWR、使用済燃料長期管理施設、地層処分場のさらなる安全向上に加え、MOX燃料の加工、再処理工場などの安全確保が課題

LWR-FR(アクチノイド[※]燃焼)

FBR

LWR、使用済燃料長期管理施設、地層処分場のさらなる安全向上、MOX燃料の加工、再処理工場などの安全確保に加え、高速(増殖)炉利用・高速(増殖)炉燃料用再処理等に伴う安全確保が課題

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

18

安全性：ライフサイクルでの被ばくリスク(1/2)

LWRフンスルー

ウラン消費量が最大となるため、フロントエンドに関わる被ばく量は最大となるが、バックエンドの被ばく量は最小となる

LWR-MOX限定リサイクル

LWR-MOXリサイクル

ウランがリサイクルされる量に応じてフロントエンドに関わる被ばくリスクが低減される可能性はあるが、バックエンドの被ばく量は増大する

LWR-FR(アクチノイド燃焼)

高速炉サイクルの導入量に応じてフロントエンドに関わる被ばくリスクが低減される可能性があるが、バックエンドの被ばく量は増大する

FBR

高速増殖炉サイクルの導入量に応じて、フロントエンドをはじめ核燃料サイクル全体の物量が減り、その被ばくリスクが低減される可能性があるが、バックエンドの被ばく量は増大する

UNSCLEAR2008年報告書(2010年7月公表)によれば、発電を目的とした原子力利用による被ばく量で支配的であるのは特に鉱山においてである、と評価されている。

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

19

安全性：ライフサイクルでの被ばくリスク(2/2)

UNSCLEAR2008年報告書に基づく原子力の平和利用に伴う一人あたりの年間被ばく線量(μSv)

局所的成分		
核燃料サイクルとエネルギー生産	採鉱と精錬 燃料製造 原子炉運転 再処理	25 0.2 0.1 2
他の利用	放射性廃棄物の輸送 副産物	<0.1 0.2
地域成分		
核燃料サイクルとエネルギー生産	燃料製造 原子炉運転 再処理	<0.01 <0.01 0.002
固体廃棄物処分と地球規模成分		
核燃料サイクルとエネルギー生産	地球規模に拡散した放射性核種	0.2
他の利用	放射性廃棄物の処分	<0.01

出典：原子力委員会 第59回定例会議 資料第1号(2010)

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

20

経済性：発電コスト(1/2)

LWRワンズルー

8.6円/kWh以上（コスト等検証委員会：直接処分モデル）

LWR-MOX限定リサイクル

8.6+α円/kWh以上（コスト等検証委員会：直接処分モデル+再処理費用分）

LWR-MOXリサイクル

8.9円/kWh以上（コスト等検証委員会：現状モデル）

LWR-FR(アクチノイド燃焼)

FBR

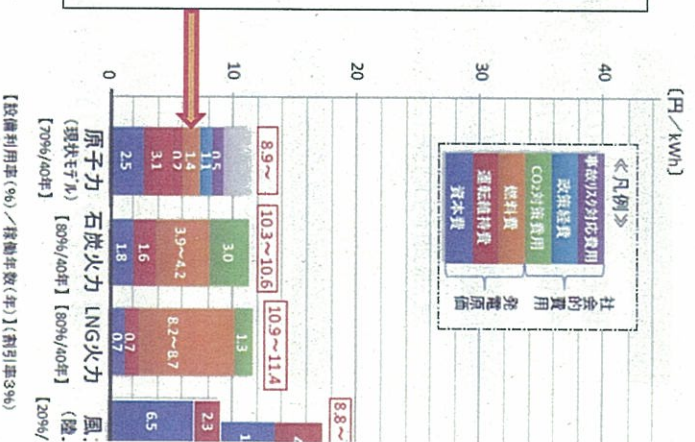
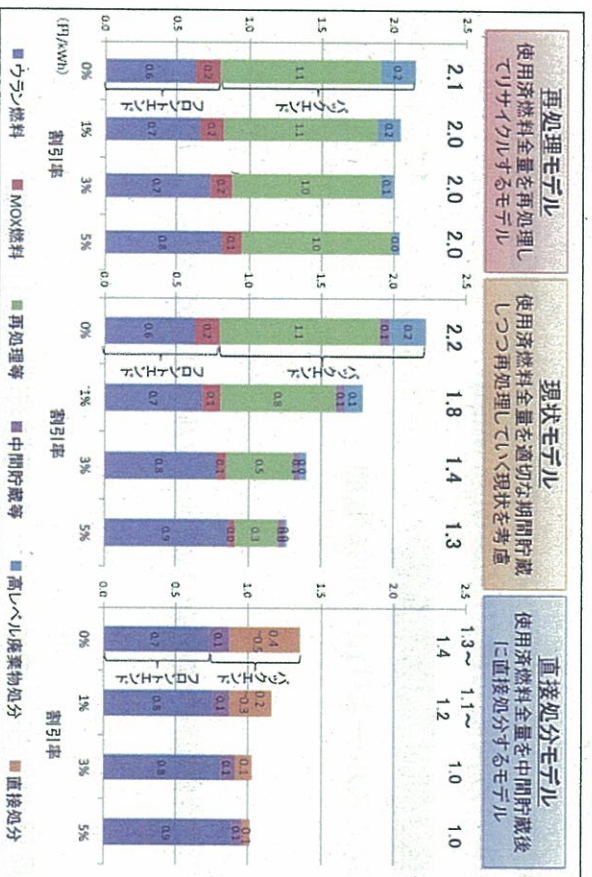
将来のLWRサイクルと同等以下が目標だが、現在は不透明

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

21

経済性：発電コスト(2/2)



出典：エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会報告書(2011)

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

22

資源有効利用：資源利用効率

LWRونسルー

・ウランを一次的に利用するのみで、ウラン利用効率は0.5%程度

LWR-MOX限定リサイクル

LWR-MOXJサイクル

フルサーマルにより、軽水炉ونسルーで使うウランよりも10～20%程度節約できる

LWR-FR(アクチノイド燃焼)

高速炉の導入量に応じて、ウラン資源の節約効果がある

FBR

ウラン利用効率は60%以上

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

23

資源有効利用：資源量(1/2)

LWRونسルー

現在のウランの確認資源量は世界のウラン可採年数として100年程度であり、今後50年間程度を見れば十分対応可能(OECD/NEA, IAEA)

LWR-MOX限定リサイクル

LWR-MOXJサイクル

資源節約効果はLWRونسルーより10～20%増加

LWR-FR(アクチノイド燃焼)

高速炉の導入量に応じて、資源節約効果がLWRサイクルより増加する

FBR

現在のウランの確認資源量が数千年のオーダーの可採年数相当に増加

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

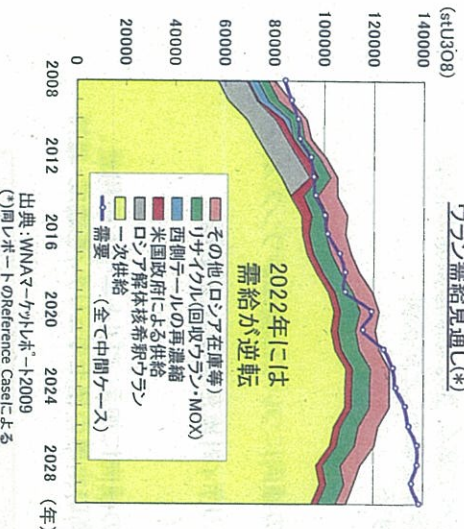
24

資源有効利用：資源量(2/2)

- 需要拡大にともない、短期的な天然ウラン市場の需給は2020年以降ややタイトになるとみられている。
- 資源埋蔵量については原子力発電への期待の拡大に伴ってウラン資源開発の活発化と、既知鉱山の埋蔵量再評価により過去5年間に賦存量が毎年約15%ずつ増加している。
- その結果、天然ウランの可採年数は5年前よりさらに伸び、100年程度とされている。

出典:OECD/NEA Red Book

ウラン需給見通し*



資源分類	2003年評価	2005年評価	2007年評価	2009年評価
発見資源(確認+推定)				
<260t/L/kgU	—	—	—	>6306
<130t/L/kgU	4588	4743	5469	5404
<80t/L/kgU	3537	3804	>4456	3742
<40t/L/kgU	>2523	>2749	2970	>796
確認資源				
<260t/L/kgU	—	—	—	>4004
<130t/L/kgU	3169	3297	>3338	3525
<80t/L/kgU	2458	2643	2598	>2516
<40t/L/kgU	>1730	>1947	>1766	570
推定資源				
<260t/L/kgU	—	—	—	2302
<130t/L/kgU	1419	1446	>2130	>1879
<80t/L/kgU	1079	1161	>1858	1226
<40t/L/kgU	>793	>799	1204	>226

単位: 1,000tU
出典: Uranium 2009

st(ショートトン): 主にアメリカで使われてきた重さの単位で、1stU3O8とは0.769tUに相当する。

出典: 原子力委員会 新大綱策定会議 資料2-1号

2012/2/16 原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回) 25

核不拡散・セキュリティ: 不拡散

LWRリソース

核拡散リスクは最小。処分後数百年から数万年にわたり転用誘引度が継続するため、この間の保障措置の必要性が課題

LWR-MOX限定リサイクル

LWR-MOXJサイクル

再処理によるフルトニウム分離、MOX燃料利用によりリソースよりリスクが高くなると考えられるが、我が国では国際共同作業で合意できる厳格な保障措置・核物質防護を開発し大型再処理工場に適用すること、将来のMOX燃料加工工場についても厳格な保障措置・核物質防護を適用することが期待できることから、再処理・MOX燃料加工の核不拡散性を高く維持することは可能

LWR-FR(ブクチノイド燃焼)

保障措置を適用することで核不拡散を担保できる
高速炉サイクルに関しては、共抽出・低除染燃料など内在的な核拡散抵抗性を高める技術開発も実施されているが、その効果については意見が分かれている

FBR

ブランクに生成する純度の高いプルトニウムへの懸念が出されており、リスクは最も高い。高度な保障措置が必要。また、共抽出・低除染燃料など内在的な核拡散抵抗性を高める技術開発も実施されているが、その効果については意見が分かれている

核不拡散・セキュリティ：テロ対策

LWRフュエル

国際基準とも整合する高い水準の核セキュリティを達成・維持することが必要
軽水炉使用済燃料は時間とともに核テロの対象となりうるリスクが高まる

LWR-MOX限定リサイクル

LWR-MOXリサイクル

核セキュリティ強化の傾向については軽水炉フュエルと比べて高く、更なる防護対策が必要
プルトニウム使用量や輸送の増加により、厳重なセキュリティ対策を取ることが必要
高次化したプルトニウムはテロリストにとっての魅力度が低下する

LWR-FR(アクチノイド燃焼)

軽水炉使用済燃料の蓄積は減少するが、核セキュリティ強化の傾向については軽水炉フュエルと比べて高く、更なる防護対策が必要。
プルトニウム使用量や輸送の更なる増加により、厳重なセキュリティ対策を取ることが必要

FBR

軽水炉使用済燃料の蓄積は減少するが、核セキュリティ強化の傾向に加え、プルトニウム使用量、輸送とも最大となり、リスクも高くなる。国際基準とも整合する高い水準の核セキュリティを達成・維持することが必要

INFCIRC/225/Rev.5が発行されるなど、国際的に核セキュリティ強化の傾向である。

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

27

廃棄物：HLWの潜在的有害度(毒性)(1/2)

LWRフュエル

使用済燃料の1000年後における潜在的な有害度はLWR-MOXリサイクルの場合の約8倍となる

LWR-MOX限定リサイクル

LWRフュエルと比べて、ガラス固化体の1000年後における潜在的有害度を約1/8に低減できる可能性がある。ただし、直接処分する使用済MOX燃料の有害度が別途増加する

LWR-MOXリサイクル

LWRフュエルと比べて、ガラス固化体の1000年後における潜在的有害度を約1/8に低減できる可能性がある。

LWR-FR(アクチノイド燃焼)

FBR

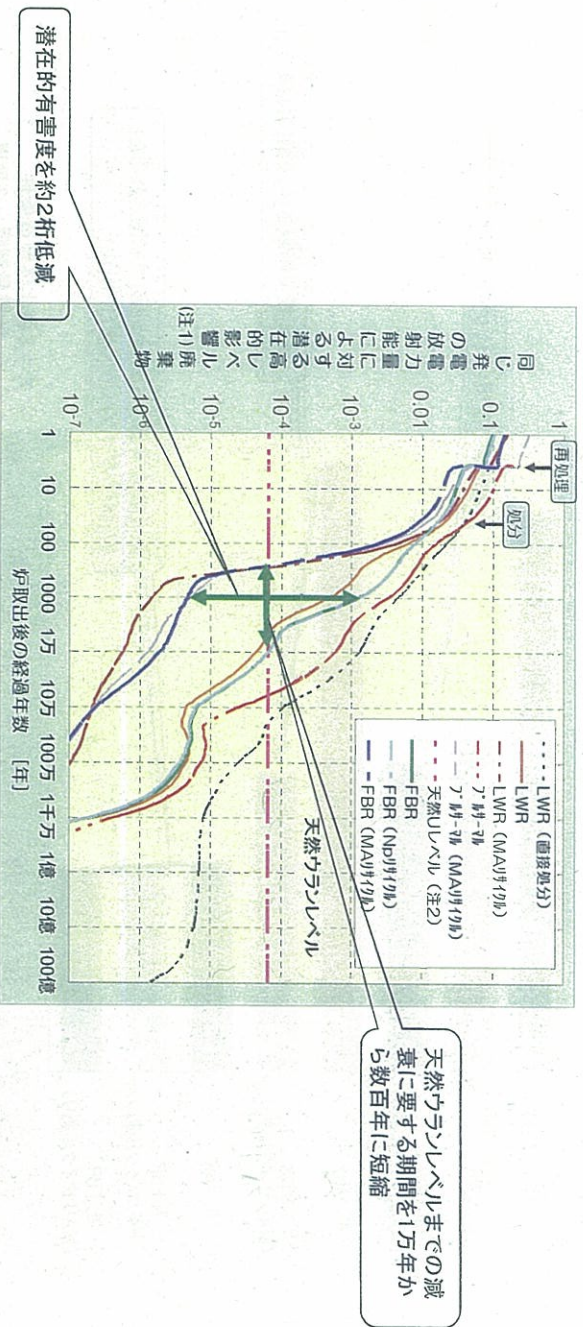
LWR-MOXリサイクルの場合に比べて1000年後の高レベル放射性廃棄物の潜在的有害度を約1/30に低減できる可能性がある

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

28

廃棄物：HLWの潜在的有害度(毒性)(2/2)



(注1) 高レベル放射性廃棄物と人間との間の障壁は考慮されておらず、高レベル放射性廃棄物の実際の危険性ではなく、潜在的な有害度(経口摂取による年摂取限度で規格化)を示している。使用済燃料取り出し直後の潜在的影響を1とした相対値。
(注2) 天然ウランレベルの線は、LWR(直接処分)のケースで燃料の原料として必要な天然ウラン(190トンを1トン)とその娘核種による潜在的な有害度の経時変化における最大値を示している。

出典：原子力委員会 分離変換技術検討会 資料1-3-2号

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

29

廃棄物：HLWの発生量(1/2)

LWRプロセス

使用済燃料の容積はガラス固化体より大きくなるが、低レベル廃棄物の物量は最小となる

LWR-MOX限定リサイクル

高レベル放射性廃棄物の発生量を低減できる

LWR-MOXリサイクル

低レベル放射性廃棄物の発生量はLWRプロセスの場合より増加する

LWR-FBR(アクチノイド燃焼)

廃棄物の分離核変換を行うことで、高レベル廃棄物の物量と処分面積を低減出来る可能性がある一方、低レベル廃棄物の物量は直接処分の場合より増加する

FBR

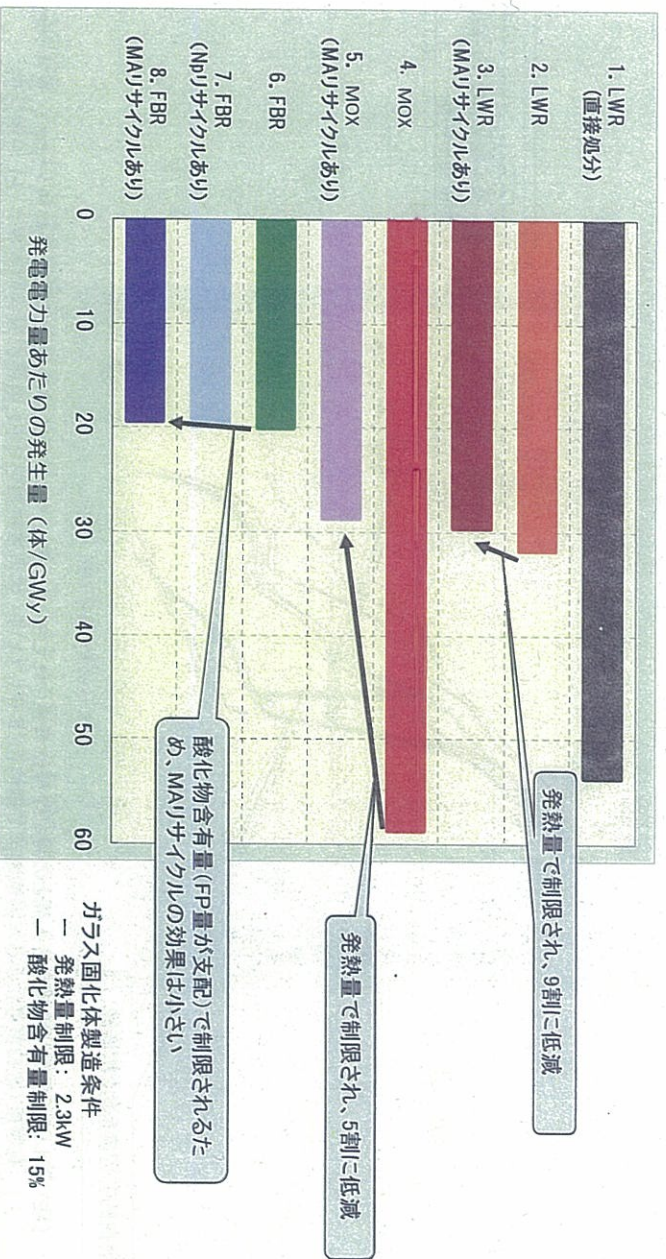
アクチノイドをFBRサイクルで燃焼することで、高レベル廃棄物の物量を低減出来る可能性がある一方、低レベル廃棄物の物量は直接処分の場合より増加する

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

30

廃棄物：HLWの発生量(2/2)



出典：原子力委員会 分離変換技術検討会 資料1-3-2号より事務局にて編集

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

31

廃棄物：廃棄物処分面積(1/2)

LWRリンスルー

ガラス固化体を埋設する場合に比べて広い面積が必要となる

LWR-MOX限定リサイクル

高レベル放射性廃棄物の発生量は再処理した場合、直接処分に必要な面積の1/2～2/3程度に抑制される。使用済MOX燃料の直接処分に要する面積は、使用済ウラン燃料を直接処分する場合の4倍程度となる。別途ガラス固化体・TRU廃棄物の処分場も必要となる

LWR-MOXリサイクル

高レベル放射性廃棄物の発生量は再処理した場合、直接処分に必要な面積の1/2～2/3程度に抑制される。別途ガラス固化体・TRU廃棄物の処分場が必要となる

LWR-FBR(アクチノイド燃焼)

FBR

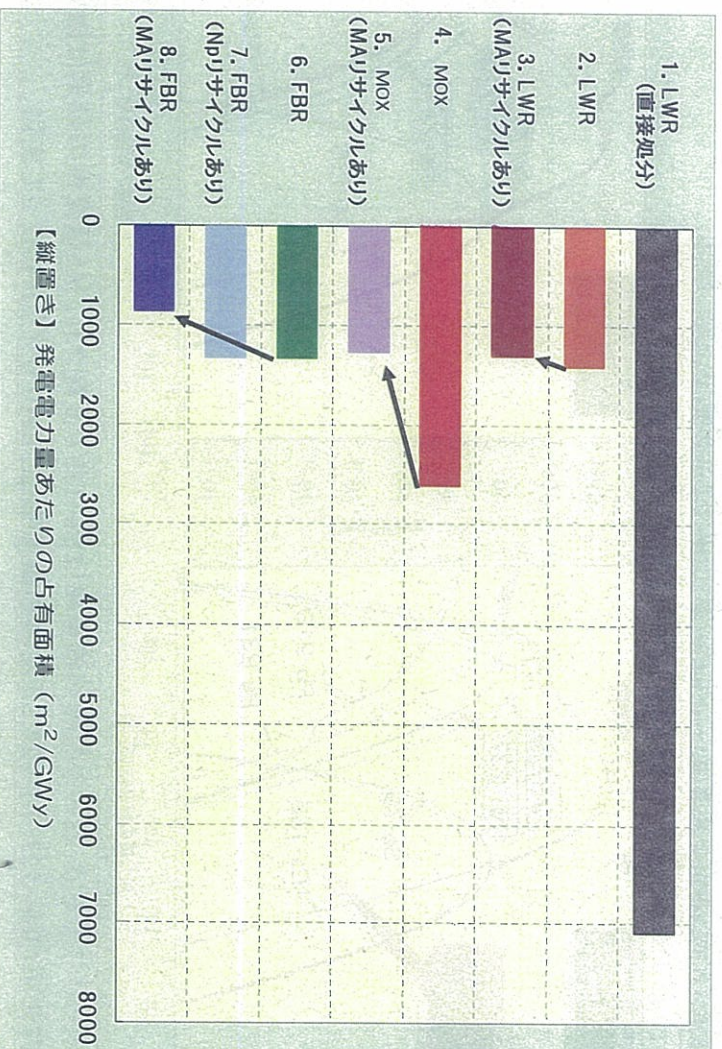
最終処分場は必要となるものの、アクチノイドを燃焼するなど分離核変換技術の積極的な採用により、高レベル放射性廃棄物の処分面積を大幅に低減できる可能性がある

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

32

廃棄物：廃棄物処分面積(2/2)



出典：原子力委員会 分離変換技術検討会 資料1-3-2号より事務局にて編集

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

33

廃棄物：HLWの被ばくリスク(1/2)

LWRونسルー

使用済燃料中のアクチノイドの原子核崩壊に伴う有害核種からの被ばくリスクが後年増大する

LWR-MOX限定リサイクル

使用済MOX燃料中のアクチノイドの原子核崩壊に伴う有害核種からの被ばくリスクが後年増大する。再処理施設から発生する高レベル廃棄物については、使用済MOX燃料よりリスクは小さい

LWR-MOXリサイクル

LWR-FR(アクチノイド燃焼)

FBR

原子核崩壊に伴う数千年後の被ばくリスクの増加はLWRونسルーやLWR-MOX限定リサイクルと比較すると十分小さく、無視し得る

ガラス固化体処分、直接処分いずれの場合も、人口バリア及び天然バリアにより完全に地層処分される

2012/2/16

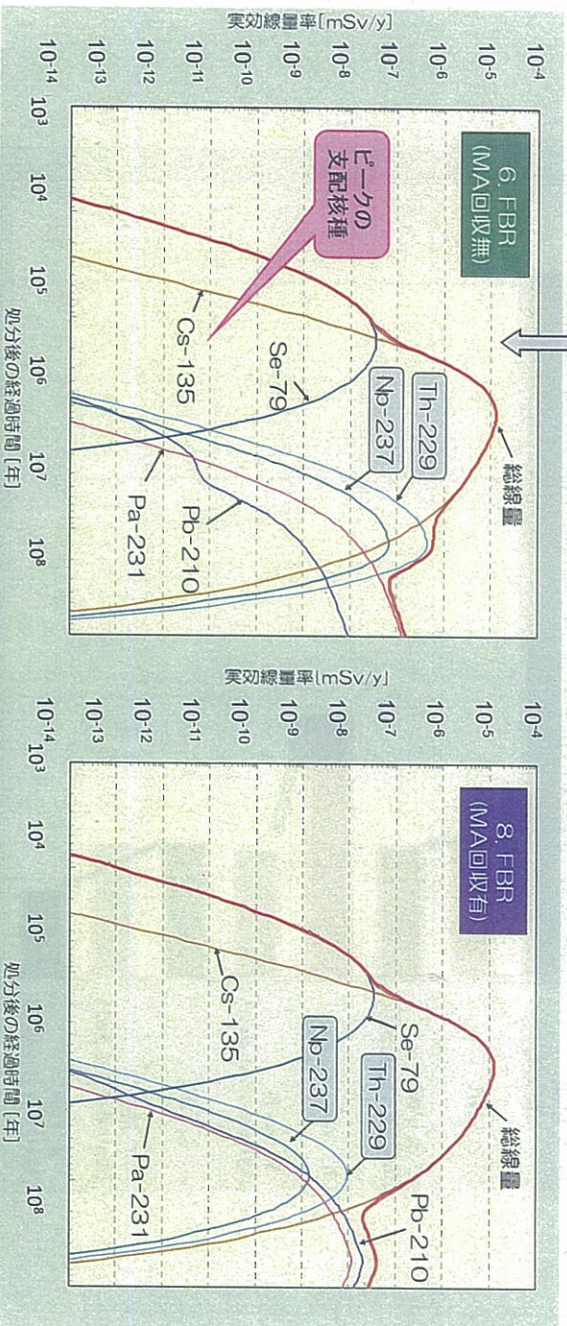
原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

34

廃棄物：HLWの被ばくリスク(2/2)

直接的リスク

諸外国で提案されている安全基準(0.1~0.3mSv/年)に比べて十分低い



- 地下水シナリオでは、ピークの実効線量率はCs-135で支配され、MA核変換の効果は限定的
- 1000万年頃のNb-237/Th-229による実効線量率は、MAサイクルによって変化

出典: 原子力委員会 分離変換技術検討会 資料1-3-2号

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

35

革新概念の技術成熟度

—TRL(Technology Readiness Level)—

TRL	開発段階	評価のポイント
1	システム概念の構築	・ 概念提示、・ 基礎データの調査など
2	技術概念の具体化	・ システム概念検討、・ 技術オプシオン評価
3	技術開発の活性化	・ 基礎的、物理的データの蓄積、・ 実験室規模の物理的試験、 ・ システム設計と要素技術の特定、開発目標の具体化
4	要素技術の開発	・ シミュレーション技術の進展、模擬実験施設的设计・建設など
5	要素技術の完成	・ 要素の製作技術の確立、・ シミュレーション技術の確立、 ・ 要素技術の工学規模単体試験、 ・ 実験炉の設計・建設、機器・システム設計の進展など
6	技術基盤の確立 (全体システム)	・ 要素技術の統合、・ 大型模擬実験施設による試験、 ・ フルスケール相当の臨界実験、・ 実験炉の試験・運転、 ・ プロトタイプ炉(原型炉含む)の設計・建設
7	プロトタイプ炉の試験運転	・ プロトタイプ炉の性能試験・運転、 ・ 実機の設計、許可取得
8	実機プラントの試験	・ 実機の建設・性能試験
9	実機プラントの運転	・ 実機の運転

出典: Proc. 11th Info. Exchg. Mtg. on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, 2010をもとに事務局にて編集

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

36

革新概念の技術成熟度の例(革新炉)

カテゴリ	システム	TRL	備考
Gen-IV	高温ガス炉	7	FSV(米), AVR(独), HTTR(日) 等
	超臨界水炉	3	概念設計レベル
	ガス冷却高速炉	3	概念設計レベル
	鉛冷却高速炉	5	KALLA(独) 等
	ナトリウム冷却高速炉	9	SPX(仏), もんじゅ(日) 等
新型転換炉	溶融塩炉	6	MSRE(米)
	ATR	7	ふげん(日)
加速器駆動システム	ADS	3	J-PARC(日)、MEGAPIE(スイス) など
小型炉・長寿命炉	TWR	1	概念検討レベル
	4S	5	米でライセンス申請を計画
トリウム燃料炉	軽水炉・ガス炉他	6	Shippingport炉(米) など

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

37

革新概念の技術成熟度の例(サイクル)

カテゴリ	システム	TRL		備考
		軽水炉	高速炉	
湿式	PUREX	9	7	La Hague再処理工場(仏) 等
	先進湿式	-	3	FACT計画(日)
	群分離	3	-	UREX法(米) 等
乾式	金属電解法	6	6	IFR計画(米) など
	酸化物電解法	4	-	実験室規模試験レベル
トリウムサイクル		2	-	概念検討レベル
	海水ウラン捕集	5		JAEA(日)

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

38

政策選択肢の評価軸(案)

－ステップ2の評価軸－

- 経済性・産業への波及効果
 - シナリオに基づく総費用など
- 社会受容性
- 選択肢の確保(柔軟性)
 - 開発の柔軟性、政策変更への柔軟性、リアルオプションのあり方 など
- 核不拡散・セキュリティ
 - 多国間管理 など
- 廃棄物・使用済燃料管理
 - 施設数、保管量 など
- 政策変更に伴う課題

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

39

参考資料

GIF炉概念：超高温ガス冷却炉

(VHTR : Very-High-Temperature Reactor System)

【特徴】冷却材：ヘリウム、温度領域：900～1000℃、出力：250～300MWe
○わが国では、原子力機構が熱出力30MWtのHTTRの建設・運転を実施中。

これを基に、電気出力300MWeの高温ガス炉ガスタービン発電システムを設計検討中。

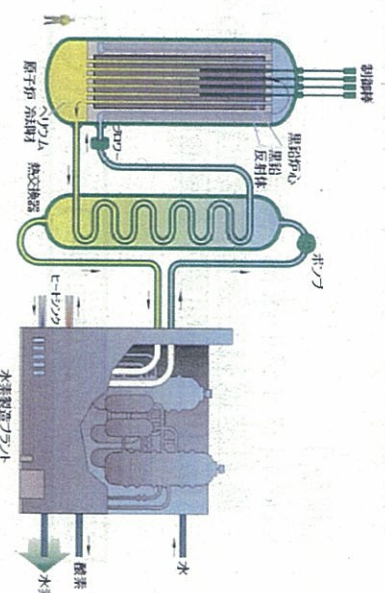
【メリット】

○熱中性子炉で、高温運転が可能なため、高効率発電とともに熱分解による水素製造など可能性がある。

【課題】

- 燃料のリサイクルに適さないため、プンスルー方式での開発を進めている。
- 高温に耐える材料開発が課題である。
(開発に長期間要する見通し)

Gen-IV炉ではないが、日本のHTTRや、米・独では高温ガス原型炉を建設・運転し発電した実績がある。



2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

41

GIF炉概念：超臨界圧水冷却炉

(SCWR : Supercritical Water-Cooled Reactor System)

【特徴】冷却材：水、温度領域：510～625℃、出力：300～1500MWe

○熱中性子炉と高速(中性子)炉との中間に位置する概念。

○わが国では、東大などを中心に研究が行われている。

【メリット】

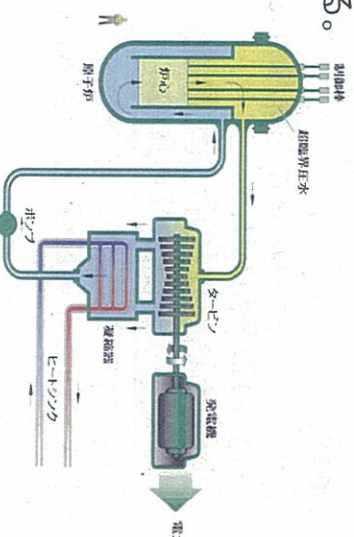
○超臨界圧22.1MPa以上では気水の分離が必要ないため、原子炉で加熱した冷却水で直接タービンを駆動して発電でき、高い熱効率(約45%)が達成できるとともに、機器の簡素化による経済性向上が図れるとされている。

○燃料リサイクルも可能。

【課題】

○超臨界圧水条件での耐腐食性燃料被覆管及び原子炉構造材料開発が課題である。
(開発に長期間要する見通し)

超臨界圧水を用いた原子炉は作られていない。



2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

42

GIF炉概念：ガス冷却高速炉

(GFR : Gas-Cooled Fast Reactor System)

【特徴】冷却材：ヘリウム、温度領域：850℃、出力：1200MWe

○炉心はピンまたは板状燃料を用いたブロック型をベースとしている。フランスを中心に検討が進められているが、概念の基本部分については、まだ検討中である。

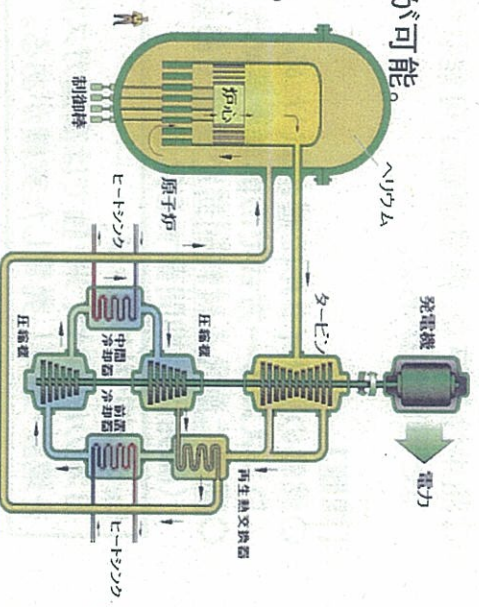
【メリット】

- 燃料のリサイクル利用が可能。
- 高温運転とエネルギーの持続可能性の両立が可能。

【課題】

- 燃料サイクル技術、高速中性子環境に耐える燃料被覆材料等の開発が課題である。
(開発に長期間要する見通し)

ガス冷却高速炉は作られていない。



2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

43

GIF炉概念：鉛冷却高速炉

(LFR : Lead-Cooled Fast Reactor System)

【特徴】冷却材：鉛or鉛/Bi、温度領域：480～570℃、出力：20～1200MWe

- 鉛冷却大型炉(1200MWe)としてはロシアで開発中のBRESTが参考概念である。
バツテリー炉(120～400MWe)は、15～30年の超長期運転が可能であり、分散電源や水素製造、海水脱塩などを目的としている。

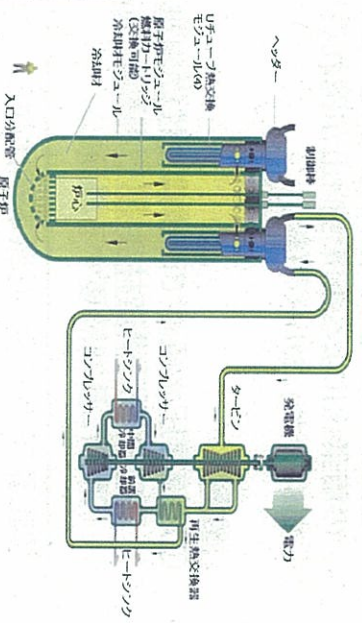
【メリット】

- 鉛の沸点が高く、また燃料のリサイクル利用に適する。

【課題】

- Bi(ビスマス)の放射化が課題である。
- 腐食の問題があり、
燃料被覆管材料の開発が課題である。
(開発に長期間要する見通し)

Gen-IV炉ではないが、ロシアにて鉛/Bi冷却高速実験炉を建設・運転した経験がある。



2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

44

GIF炉概念：ナトリウム冷却高速炉

(SFR : Sodium-Cooled Fast Reactor System)

- 【特徴】冷却材：ナトリウム、温度領域：500～550℃、出力：50～1500MWe
 ○酸化物燃料と先進湿式再処理方式を組み合わせた概念(原子力機構のJSFR)と、金属燃料と乾式再処理を組み合わせた概念(韓国)等が選定されている。
 ○前者は、「常陽」「もんじゅ」を踏まえて、原子力機構がFaCTプロジェクトで検討中の大型ループ型炉であり、原子炉構造のコンパクト化、ループ数削減、一次系機器の合体等による経済性向上を特長としている。

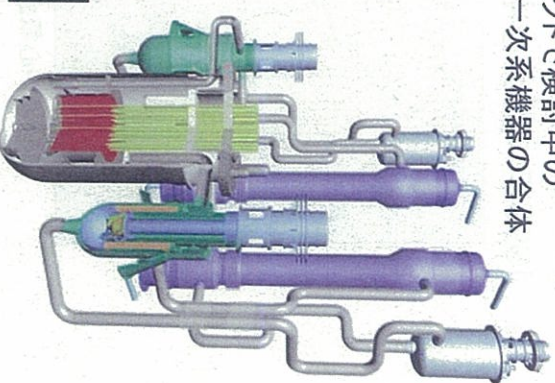
【メリット】

- ナトリウムの沸点が高く、また燃料リサイクルに適しており、エネルギーの持続可能性で特に優れている。
- 実用化に最も近い高速炉概念で、国際標準となる安全クワイテリアの構築を進めている。
- 各国で開発が進められており、国際協力が可能である。

【課題】

- 経済性向上が課題である。
- 水・空気とNaとの化学反応の防止が課題である

Gen-IV炉ではないが、「もんじゅ」等のナトリウム冷却高速原型炉を、各国で建設・運転し、発電した実績がある。



2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

45

GIF炉概念：熔融塩炉

(MSR : Molten Salt Reactor System)

- 【特徴】冷却材：熔融塩、温度領域：700～800℃、出力：1000MWe
 ○液体のトリウム及びウランのフッ化物物が燃料かつ冷却材として黒鉛炉心チャンネル内を流れる熱中性子炉である。
 ○炉心で発生した熱は中間熱交換器により外部に取り出す。

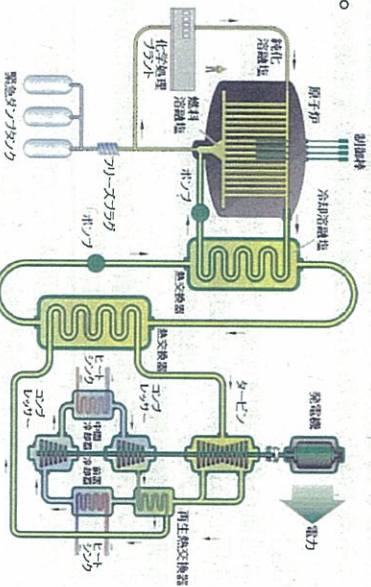
【メリット】

- FPは液体燃料から連続的に除去され、燃料はリサイクル利用される。
- 燃料交換なしで、長時間の運転が可能である。

【課題】

- 耐腐食性の構造材料開発等が課題である。
(開発に長期間要する見通し)
- 高放射能環境の1次系のメンテナンス技術が課題である。

Gen-IV炉ではないが、アメリカにて熔融塩実験炉を建設・運転した経験がある。



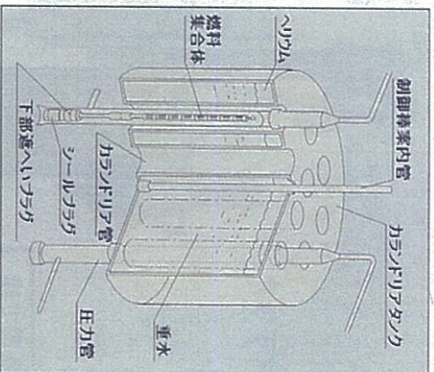
2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

46

新型転換炉 (ATR: Advanced Thermal Reactor)

- 重水減速沸騰軽水冷却縦型圧力管原子炉
- プルトニウム、回収ウラン等を柔軟かつ効率的に利用できるという特徴を持つ原子炉として我が国で自主開発
- 1995年に開発を中止し、廃炉を進めている



ふげん炉心概念図



ふげん全景
出典: 動燃30年史・「ふげん」イベント

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

47

加速器駆動システム

(ADS: Accelerator-driven System)

【特徴】 核破砕ターゲット及び冷却材: 鉛or鉛ビスマス合金、熱出力: ~800MW

- 未臨界状態の原子炉における核分裂の連鎖反応を加速器中性子源で維持する概念。
- マイナーアクチノイドを大量に含む燃料を安全に核変換することが主目的。

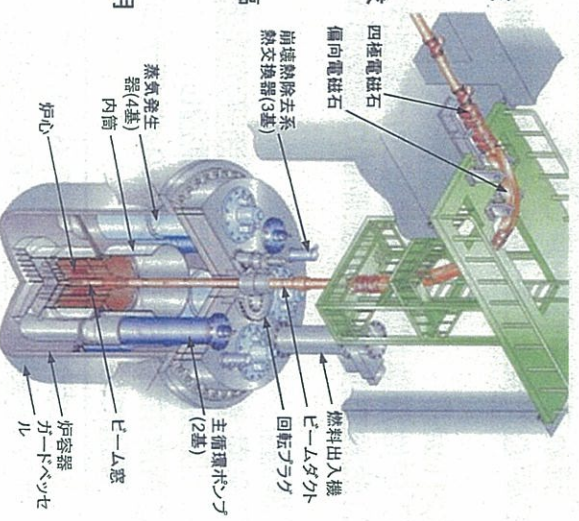
【メリット】

- 未臨界のため、加速器を停止すれば連鎖反応が即座に停止。
- マイナーアクチノイドの高速中性子による核分裂反応で効果的な核変換を達成。
- 核変換で生じる熱で発電し、加速器へ給電するとともに、外部へ売電することも可能
- 核変換が主目的なので、冷却系の高温化による高発電効率の追求は不要であり、冷却材による鋼材腐食の影響を緩和できる。

【課題】

- 加速器の停止頻度低減、ビーム窓部の工学的成立性の確証、未臨界炉心の運転制御等の固有の技術課題が存在。
- マイナーアクチノイド燃料の製造、照射挙動、照射後処理等に関する研究開発が課題。
- 鉛ビスマス合金を用いる場合はビスマスの放射化が課題。純鉛を用いる場合は冷却系の高温化が課題。

日本ではJ-PARCで基礎的な実験の計画があり、ベルギーでは実験炉級施設建設の計画がある。



2012/2/16

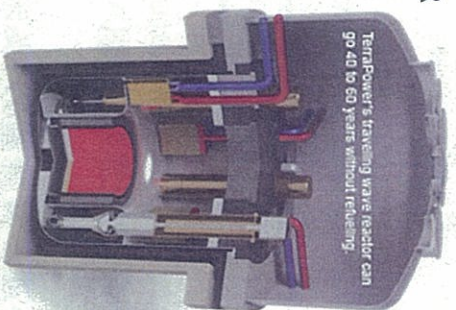
原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

48

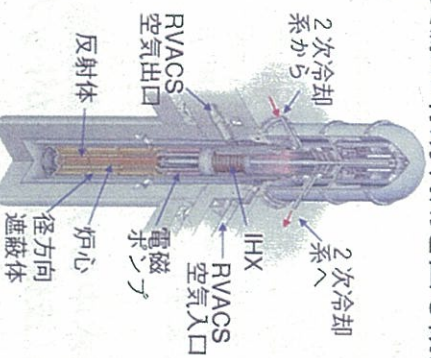
小型炉・長寿命炉

炉心を長寿命化または連続燃焼可能として、ウラン資源の有効利用を図る概念

TWR



4S



The traveling wave reactor (TWR) は GIF の次の段階の概念である。フッ素-サークルを採用し、必要な時に必要な場所の核分裂性物質を燃料として使用する。ひとたび濃縮された燃料を用いてウエーンが開始されれば、核燃料物質は必要とせず、劣化ウランがある限り発電が継続する。炉の燃焼制御方法、大量の燃料を保有する点についての安全確保、長寿命炉心に対応する燃料・材料等が課題である。

長寿命炉心の実現による核拡散抵抗性とメンテナンスの低減、受動的安全設備の導入による安全性の向上を目指した小型高速炉 (4S)。金属燃料を反射体で制御する電気出力1万kWの4S炉心は、30年の炉心寿命を保持。送電インフラのない地域等での電力供給、熱供給、海水淡水化等、地域共生型の原子力多目的利用に貢献可能。大量の燃料を保有することに対する安全確保、長寿命炉心に対応する材料の開発が課題。

基礎的な概念検討レベル

米でライセンス申請を計画中

出典: <http://www.terrapower.com> をもとに事務局にて作成

出典: 電力中央研究所 研究年報(2007)をもとに事務局にて作成

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会 (第7回)

49

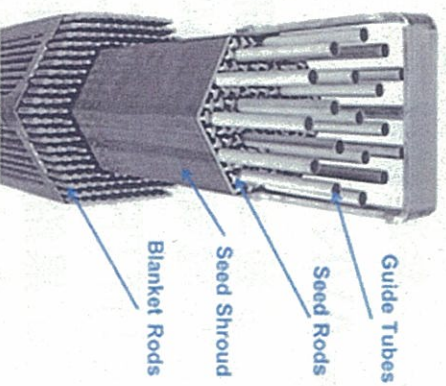
トリウム燃料炉



- Th-232に中性子を照射することで生成するU-233を燃料とする概念

- Thを新たな核燃料の資源として、資源有効利用、燃料増殖、Pu燃焼用の母材兼ブライバ燃料として軽水炉などでの利用が検討されている

- Th-U-233に対応する新たな核燃料サイクル技術(特に再処理が課題)とともに、U-233生成時に生成するU-232の遠隔操作技術が必要
- U-Puサイクルに比べ増殖性能や核変換性能は劣る
- Th-Uサイクルの核拡散抵抗性はU-Puサイクルと同程度 (IAEA INFCE (1980))



高温ガス炉などでトリウム燃料の利用実績がある。

米LightBridge社のVVER用Th試験燃料 (VVER:ロシア型PWR)

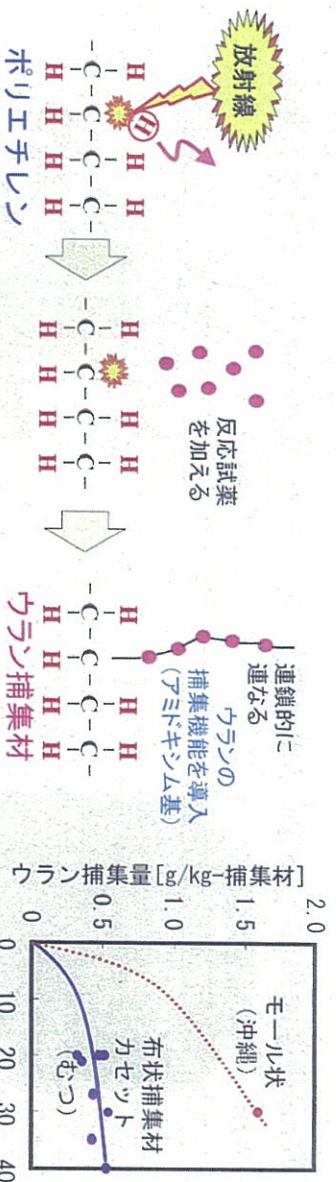
出典: LightBridge社HP

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会 (第7回)

50

海水ウラン捕集



海水中のウランを放射線を用いて改良した高分子の捕集材を用いて捕集(技術では日本がトップクラス)

海水1t中には3.3mgのウランが溶存し、黒潮が運ぶ資源量の1%未満で国内需要は充足可能だが、温暖地沿岸に1000km²程度の捕集材の係留場所が必要

基礎基盤的な研究段階であるが、チャンピオンデータに基づく捕集コスト(原価)は、2009年5月のウラニスポット価格(\$51/ポンド-U₃O₈)の3倍程度に相当と推定

出典:原子力委員会第20回定例会議(2009年)

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

51

用語解説

■ FSV(Fort St. Vrain)炉

- 米国の発電用高温ガス炉(電気出力330MW)。1989年運転終了。

■ AVR

- 独ユーリツヒ研究所に設置された球状燃料を用いる電気出力15MWの発電用実験炉。1988年閉鎖。

■ HTTR(高温工学試験研究炉)

- 黒鉛製の燃料ピンが挿入された黒鉛ブロックを積層した、ピンインボックス型炉心を有する熱出力30MWの実験炉。1998年に初臨界に到達(運転中)。

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

52

用語解説

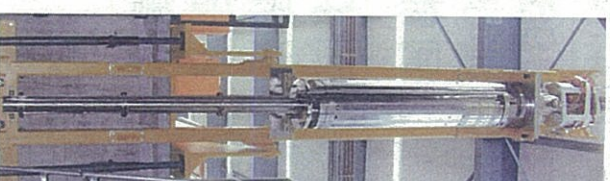
■ KALLA(The Karlsruhe Lead Laboratory)



- 独Karlsruhe研究所に加速器駆動システムの研究開発のために設置された大型の液体鉛ビスマスループ

■ MEGAPIE(MEGAwatt Pilot Experiment)

- スイスPSI研究所で用いられた世界初の鉛ビスマス核破碎中性子源。



2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

53

用語解説

■ SPX(Super Phenix)

- 世界初の商業規模高速増殖実証炉として1986年に電気出力124万kWに到達。1998年、ジョスパン政権の方針により閉鎖。

■ もんじゅ

- 高速増殖原型炉。電気出力約28万kW、増殖率約1.2。1994年4月臨界を達成、1995年8月に初送電したが、同年12月2次冷却系ナトリウム漏えい事故が発生。現在は炉心確認試験を実施中。

用語解説

■ MSRE (Molten-salt Reactor Experiment)

- 1965年初臨界。熱出力8MW。U235, U233, Pu添加U233による運転が行われ、様々な核燃料で運転可能な柔軟性を実証。1969年に閉鎖。

■ Shippingport炉

- 世界発の実用発電用PWRとして米国で1958年より運転開始。電気出力6万kW。トリウム燃料からのウラン増殖の可能性を実証した。1982年閉鎖。

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

55

用語解説

■ La Hague再処理工場

- フランス・マルクールにあり、UP2施設とUP3施設から構成される。
- UP2施設は、当初ガス炉用であったが、後に軽水炉用燃料の再処理も可能とした。800トン/年の処理能力を有するUP2-800が1994年8月に操業開始。
- UP3施設は、1990年8月に操業を開始。年間処理能力は800トン/年。1970年代にドイツ、日本、ベルギー、スイス、オランダと再処理委託契約を締結
- 両施設は順調に稼働しており、2000年には、UP2とUP3を合わせて、1,198トン/年(1999年は1,562トン/年)の使用済み燃料を再処理した。

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

56

用語解説

■ FACT

■ J-PARC

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

57

用語解説

■ UREX法

- 米GENEPの枠組みの下で、PUREX法を基本として、高速炉での分離変換を視野に入れた様々な核種の分離方法をパッケージで開発している

■ IFR(Integral Fast Reactor)計画

- 米アルゴンヌ国立研究所の金属燃料高速炉開発計画。伝熱特性に優れ、乾式再処理が適用可能な金属燃料を採用。500℃前後の高温での燃料取扱い技術が課題とされた。1994年に議会が計画中止を決定。

2012/2/16

原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会(第7回)

58

